

Universidad Politécnica de Madrid



Restauración del tramo canalizado del Arroyo de las Canteras

Castro del Río, (Córdoba)

Madrid, 2015

Autora: Cristina Rodríguez Coslado
Director: D. Germán Glaría Galcerán
Tutora: Carolina Martínez Santa-María

Restauración del tramo canalizado del arroyo de las Canteras Castro del Río (Córdoba)

Madrid, 2015

Autora: Cristina Rodríguez Coslado

Tutora: Carolina Martínez Santa-María

RESUMEN

La finalidad de este proyecto es el estudio de la recuperación del último tramo del arroyo de las Canteras a su paso por Castro del Río, eliminando el canal existente para dotar al arroyo de cierta naturalidad y proponiendo distintas alternativas que solucionen los problemas de erosión y los recurrentes problemas de inundaciones en la localidad.

Para la realización del proyecto, se han analizado tanto las condiciones del tramo fluvial como las correspondientes a la cuenca vertiente mediante una caracterización completa. Por otro lado, se ha realizado un estudio hidrológico para calcular distintos caudales generados en la cuenca asociados a distintos periodos de retorno; varios estudios hidráulicos, fundamentalmente modelizaciones del comportamiento del canal con el software HEC-RAS; y un estudio de erosión hídrica utilizando el método MUSLE con el caudal asociado a un periodo de retorno de 500 años.

Con los resultados obtenidos se ha establecido un diagnóstico de la problemática existente y se han planteado y modelizado distintas alternativas. Como medidas estructurales dentro del tramo destacan: el redimensionamiento del cauce eliminando el hormigón, la variación de la curva del canal y la disminución de la pendiente mediante la creación de una serie de saltos. Como soluciones estructurales fuera del tramo de estudio cabe señalar la creación de diques de laminación y una llanura de inundación artificial para disminuir el caudal. Finalmente como medida no estructural, se realizará un cambio de usos y prácticas de conservación del olivar a nivel de cuenca.

En conclusión, con la restauración, aparte de la mejora ambiental que se pretende conseguir, se realizará una mejora social. Dicha mejora social se obtendrá evitando las frecuentes inundaciones y eliminando el impacto visual que produce el canal gracias a la mejora de la calidad del entorno. Además, se concienciará a los habitantes de la zona para que entiendan que la solución al mal estado y comportamiento de un curso de agua no proviene únicamente de una gran obra en la zona problemática, sino de la aportación individual para reducir e incluso eliminar la fuente del problema.

ABSTRACT

The aim of this project is to study on the restoration and flood risk management of the stream “Arroyo de las Canteras” on its reach at Castro del Río.

The project contemplates several actions upon this segment of the stream.

In order to provide natural conditions and avoid floods, first of all, the canal will be dismantled. After that, it is necessary to design several alternatives that can solve erosion problems and can eliminate flood damages in the village.

In order to carry out the project, river reach conditions and river basin state have been analyzed. On the one hand, a hydrologic study has been realized in order to obtain different flows associated to different return periods. In addition to this, hydraulic studies, mainly the modeling of several flows and his behaviors in the channel by HEC-RAS, have been developed. In the other hand, an erosion study with MUSLE methodology has been developed in order to calculate the flow for a 500 year return period and thus, obtain the data for the runoff produced in the hydrologic basin.

With the results provided by these studies, problem sources have been found, and consequently, different alternatives have been designed in order to reduce the runoff amount that ends up in Arroyo de las Canteras:

- a) Alternatives with structural solutions inside the study reach: such as resize the channel by removing old concrete elements present in it, re-shape the curve of the canal and reduce the slope using a series of little waterfalls.*
- b) Alternatives with structural solutions outside the study reach: for example the building of laminating dikes and an artificial flood plain in order to keep water-flow under control.*
- c) Alternatives with non-structural solutions: such as the change of the hydrographic basin uses and the establishment of conservation practices of the olive grove.*

In conclusion, this set of actions produces an important environmental and social improvement. In one hand, floods will disappear in Castro del Río, and the environmental and landscaping quality will be restored. In the other hand, local authorities and neighbors will realize that the bad conditions and behavior of watercourses can be solved only through a big work of civil engineering on the problem area, but taking small individual steps, they will solve the problem at its roots.

ÍNDICE DEL PROYECTO

Memoria

Anejos de la memoria

- Anejo 1: Caracterización de la zona de estudio
- Anejo 2: Estudio hidrológico e hidráulico
- Anejo 3: Estimación de erosión hídrica y emisión de sedimentos
- Anejo 4: Propuesta de soluciones técnicas y justificación

Bibliografía

MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. ANTECEDENTES, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....	4
2. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	4
3. ESTUDIO HIDROLÓGICO	10
4. ESTUDIO HIDRÁULICO	10
5. ESTIMACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA Y EMISIÓN DE SEDIMENTOS.....	14
6. PROPUESTA DE SOLUCIONES TECNICAS Y JUSTIFICACION.....	17
6.1. Alternativas estructurales dentro de la zona de estudio.....	18
6.1.1. Alternativa 1: Aumento de la altura del muro	18
6.1.2. Alternativa 2: Restauración del antiguo cauce	18
6.1.3. Alternativa 3: Retirada del hormigón y redimensionamiento del cauce actual	19
6.1.4. Alternativa 4: Modificación del trazado y creación de saltos.....	24
6.1.5. Alternativa 5: Alterativa 4 con Q_{T100}	26
6.1.6. Alternativa 6: Modificación del trazado y creación de saltos (Opción 2).....	27
6.2. Alternativas con medidas estructurales fuera del tramo.....	28
6.2.1. Construcción de diques de laminación.....	28
6.2.2. Creación de una llanura de inundación aguas arriba del tramo	28
6.3. Alternativas con medidas no estructurales.....	29
6.3.1. Modificación de los usos del suelo y prácticas de conservación.....	30
7. RESUMEN DE LAS ALTERNATIVAS.....	33
8. CONCLUSIONES	36

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1: Cuenca hidrográfica del Guadalquivir.....	5
Fig. 2: Localización del canal.....	6
Fig. 3: Perfil longitudinal del arroyo de las Canteras.....	6
Fig. 4: Mapa de pendientes reclasificada en %	7
Fig. 5: Mapa del Modelo Digital del Terreno de la cuenca del arroyo de las Canteras.....	7
Fig. 6: Diagrama ombrotérmico o climodiagrama de Castro del Río, Córdoba.....	7
Fig. 7: Mapa de usos del suelo de la cuenca del arroyo de las Canteras.....	8
Fig. 8: Vista de la cobertura de la uenca desde Castro del Río.....	9
Fig. 9: Zonificación del tramo.	11
Fig. 10: Perfil longitudinal del tramo de actuación con cota de lámina de agua.	12
Fig. 11: Gráfico de velocidades para el tramo de estudio.	12
Fig. 12: Gráfico del número de Froude.	12
Fig. 13: Zona de desbordamiento producido con el caudal T500.....	13
Fig. 14: Mapa de valores del factor “K” de la cuenca del arroyo de las Canteras.....	15
Fig. 15: Mapa de valores del factor “C” de la cuenca del arroyo de las Canteras..	15
Fig. 16: Mapa de valores del factor “P” de la cuenca del arroyo de las Canteras.....	16
Fig. 17: Mapa de valores del factor “LS” en la cuenca del arroyo de las Canteras.....	16
Fig. 18: Visión de la falta de naturalidad del arroyo debido al canal.	17
Fig. 19: Detalle del desbordamiento en el perfil 220 con altura de muro actual.	18
Fig. 20: Comparación de cauce natural y cauce canalizado.	19
Fig. 21: Zonificación de los nuevos perfiles.....	20
Fig. 22: Planta con distribución de nuevos perfiles.....	20
Fig. 23: Nuevo diseño de la curva del canal	21
Fig. 24: Variación del trazado en planta (Nueva curva).	22
Fig. 25: Pendiente del tramo después de la actuación.	23
Fig. 26: Velocidades del tramo después de la actuación	23
Fig. 27: Pendiente del tramo después de la actuación.	24
Fig. 28: Gráfico de velocidades del tramo después de la actuación.....	24
Fig. 29: Gráfico de “n” de Manning en el tramo después de la actuación.	25
Fig. 30: Ejemplo de dissipador de energía aguas abajo del salto.....	25
Fig. 31: Comparación de velocidades en el tramo de la alternativa 4 con Q_{T100}	26
Fig. 32: Comparación de n° de Froude en el tramo de la alternativa 4 con Q_{T100}	27
Fig. 33: Tramo aguas arriba de la zona de actuación del arroyo de las Canteras.....	29
Fig. 34: Imagen objetivo de bosque de encina en pendiente.	30
Fig. 35: Imagen objetivo de pastizal con arbolado disperso.....	31
Fig. 36: Olivar en terrazas con vegetación permanente.	31
Fig. 37: Olivar con vegetación espontánea.	31
Fig. 38: Olivar con calles de vegetación perpendiculares a la pendiente.	31
Fig. 39: Olivar a suelo desnudo.	32

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Caudales resultantes según el periodo de retorno..... 10

Tabla 3: Resumen de resultados según zonificación. 13

Tabla 4: Pendiente máxima admisible en las tierras de cultivo..... 30



1. ANTECEDENTES, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Los ríos en España no presentan en gran parte de los casos un estado ambiental adecuado, debido a un uso intensivo y a una explotación de sus recursos sin considerar la integridad de su funcionamiento como ecosistemas. Estos requieren un nuevo enfoque en su gestión y aprovechamiento más acorde con los principios de desarrollo sostenible y de conservación de la biodiversidad, coincidentes con los objetivos de la Directiva Marco del Agua.

Las iniciativas propuestas por el Ministerio de Medio Ambiente, incluidas dentro de la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos, han conseguido unos resultados de gran valor y beneficio para los ríos, marcando un cambio estratégico en los aspectos relacionados con el uso de las aguas y el control de su calidad. Sin embargo siguen existiendo otros aspectos a mejorar, especialmente los relativos a las condiciones hidromorfológicas de los cauces y sus riberas, requiriendo para ello definir nuevas líneas de actuación que permitan recuperar la dinámica y resiliencia de los sistemas fluviales y fomenten cada vez en mayor medida su restauración y conservación.

En esta nueva fase de los trabajos se va a proceder a la realización de actuaciones de mejora del estado ecológico de los ríos, tomando como base el estudio de presiones e impactos (IMPRESS) desarrollado por las distintas Confederaciones. Se trabajará de forma puntual para limitar los daños por inundaciones únicamente en núcleos urbanos o que hayan afectado a infraestructuras, como es el caso de estudio en este proyecto. Se realizarán actuaciones en las que se han de conjugar criterios de morfología, hidrología e hidráulica fluvial con otros criterios ambientales, paisajísticos y socioeconómicos, a fin de aproximarse a la resolución de estos problemas de daños por inundaciones.

Este proyecto, ajustándose a la Estrategia Nacional de Restauración de ríos, plantea la necesidad de dimensionar y proyectar la retirada del canal existente en el arroyo de las Canteras, localizado en Castro del Río, Córdoba.

La finalidad de dicha actuación es recuperar ambientalmente el tramo canalizado dentro de lo posible y evitar futuros desbordamientos dentro del núcleo urbano.

2. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para la caracterización de la zona de estudio, tanto el global de la cuenca como el tramo de actuación en concreto se ha partido de información de diferentes capas digitales. Todas ellas proyectadas en el sistema geodésico de referencia ETRS89 con proyección UTM Huso 30.

- Modelo Digital del Terreno 1:25.000.
- Capa vectorial de polígonos con información del mapa edafológico nacional a escala 1:50.000. Tipos de suelo (MAGNA50).



- Capa vectorial de líneas con la red hidrográfica y curvas de nivel de España. (BCN25) (Escala 1:25.000).
- Capa vectorial de polígonos SIOSE (usos del suelo)
- Mapa edafológico digital (1:1.000.000), editado en el año 2001 por el Sistema Español de Información de Suelos.
- Ortofotografía aérea digital (PNOA máxima actualidad, 2004, y vuelo Americano del 1956)

Para abarcar la totalidad de la cuenca, todas estas capas requieren dos hojas del MTN50, la hoja 0945 (Castro del Río) para la mitad norte de la cuenca, y la hoja 0967 (Baena) para la mitad sur.

El tramo objeto de restauración consiste en el tramo final del arroyo de las Canteras, afluente del río Guadajoz por su margen izquierda. El arroyo nace en el Cerro del Viso y discurre únicamente por el término municipal de Castro del Río. Pertenece a la cuenca hidrográfica del Guadalquivir.

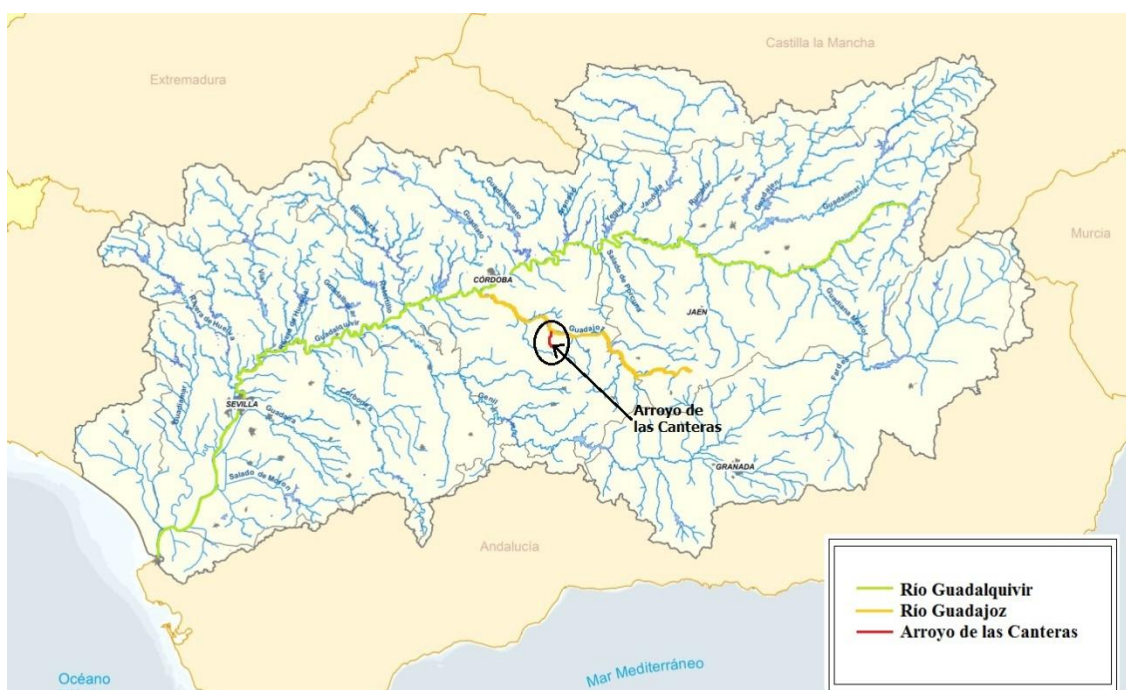


Fig. 1: Cuenca hidrográfica del Guadalquivir. (Obtenido de <http://www.chguadalquivir.es/>)

El tramo de actuación está localizado en las afueras de la localidad de Castro del Río (Córdoba). En la zona sur-este. Comienza con el final de las últimas parcelas con edificaciones cercanas al cauce hasta la confluencia con el río Guadajoz.

El tramo de actuación tiene una longitud aproximada de 520 metros, los cuales, 440 metros se encuentran canalizados.

Las coordenadas de principio y final del canal son las siguientes:

Coordenada 1: European Datum ETRS89, UTM (30). X: 369892, Y: 4171687

Coordenada 2: European Datum ETRS89, UTM (30). X: 369950, Y: 4172110



Fig. 2: Localización del canal. (Fuente: Iberpix)

CUENCA

La cuenca del arroyo de las Canteras tiene las siguientes características:

- **Área:** 8,84 km²
- **Perímetro:** 13,19 km
- **Coefficiente de Gravelius:**
Kc = 1,2416
- **Pendiente media de la cuenca:** 13.22 %
- **Elevación media de la cuenca:** 366,38 m
- **Pendiente media del cauce principal:** 0,052 m/m
- **Longitud del cauce principal:** 5,63 km



Fig. 3: Perfil longitudinal del arroyo de las Canteras. (Modelo Digital del Terreno de Andalucía)

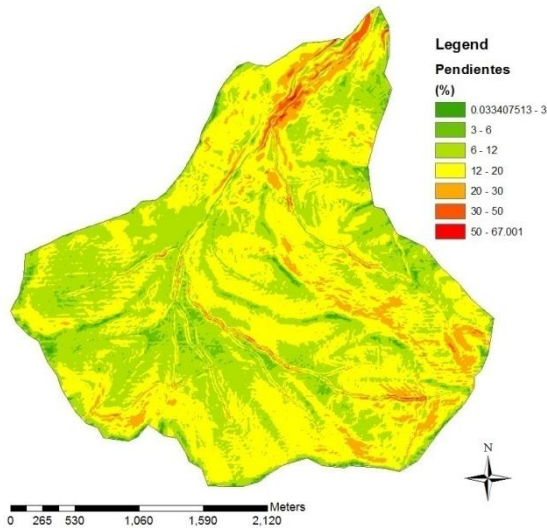


Fig. 4: Mapa de pendientes reclasificada en %
(Elaboración propia)

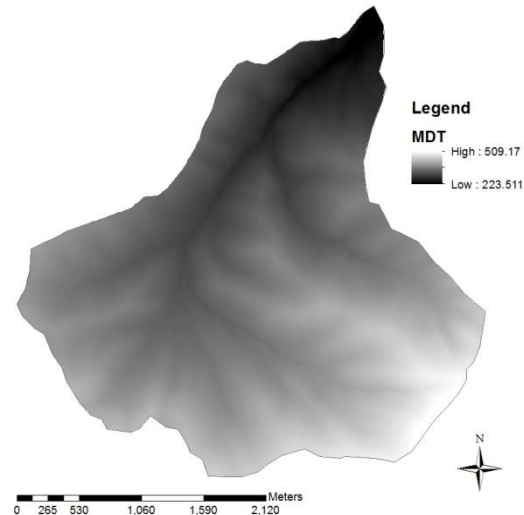


Fig. 5: Mapa del Modelo Digital del Terreno de la cuenca
del arroyo de las Canteras. (Elaboración propia)

CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

En lo que se refiere a la climatología de la zona, Castro del Río mantiene la constante mediterránea de veranos bastante calurosos, inviernos templados-fríos y una escasa y desigual distribución de las precipitaciones que conlleva una fuerte erosión, todo ello en un marco de cierta continentalización.

De acuerdo con Köppen y Geiger, el clima se clasifica como Csa: Mediterráneo y el piso bioclimático según Rivas Martínez (1987), se encuentra entre Mesomediterráneo y Termomediterráneo

Según los datos de la estación meteorológica más cercana (5428A), el diagrama ombrotérmico de Castro del Río para un periodo de observación de 31 años es:

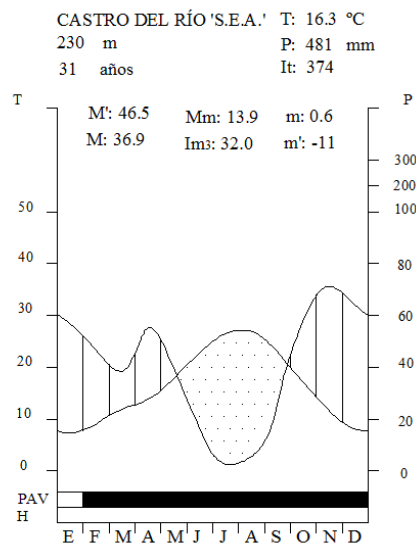


Fig. 5: Diagrama ombrotérmico o climodiagrama de Castro del Río, Córdoba. (Elaboración propia)



GEOLOGÍA Y EDAFOLOGÍA

Según el mapa MAGNA50 del Instituto Geográfico Nacional, la totalidad de la cuenca, y por lo tanto toda la zona de actuación, está formada por margas blancas arenosas.

Con respecto a la edafología, se ha consultado el mapa edafológico digital a escala 1:1.000.000, editado en el año 2001 por el Sistema Español de Información de Suelos, este indica que un pequeño sector noreste de la cuenca se encuentra sobre Vertisol crómico y el resto sobre Cambisol cálcico.

USOS DEL SUELO

Para la identificación de los usos del suelo, a escala de la cuenca vertiente, se ha utilizado el Mapa de Usos del suelo del SIOSE.

La totalidad de la cuenca está cubierta actualmente por olivar, exceptuando los márgenes del arroyo, los cuales que presentan una estrecha franja de vegetación natural formada por una cubierta de matorral y pastizal.

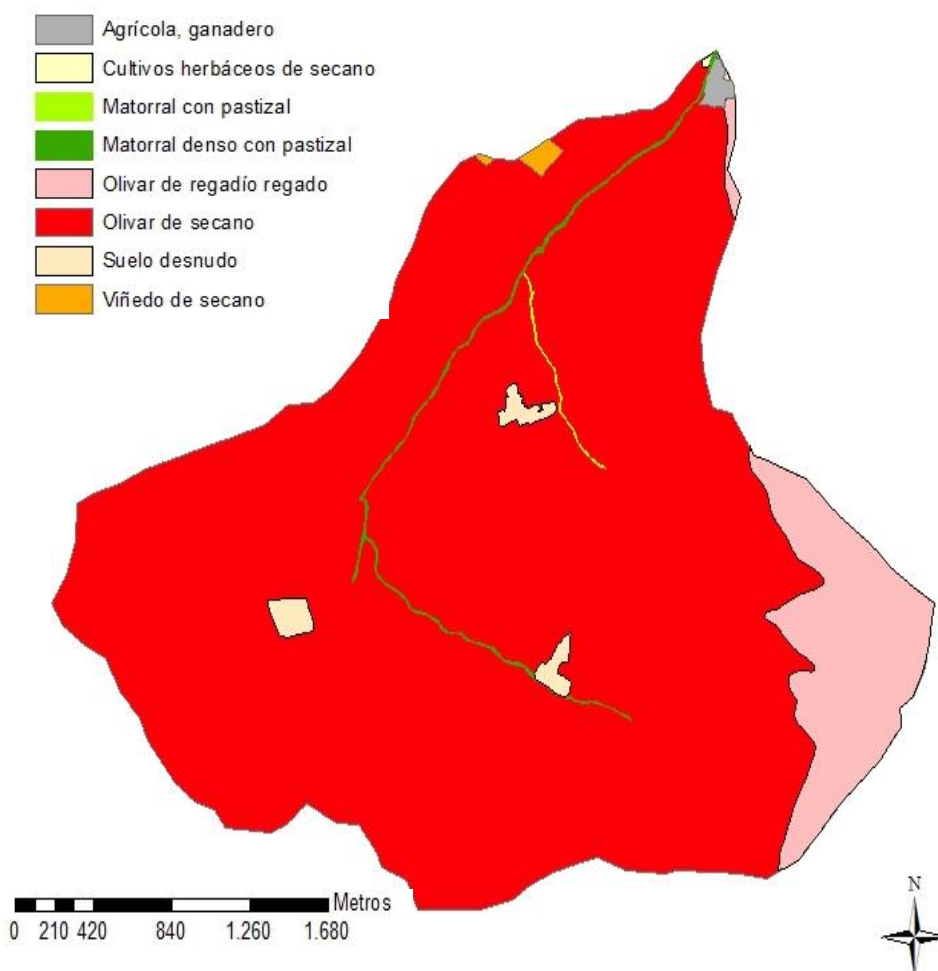


Fig. 6: Mapa de usos del suelo de la cuenca del arroyo de las Canteras. (Elaboración propia)



VEGETACIÓN

Como se ha visto anteriormente, la cuenca del arroyo de las Canteras no existe prácticamente vegetación natural ya que el 98% del espacio se encuentra antropizado, salvo en estrechas zonas de un par de metros a los lados de los cauces ya que toda la cuenca se encuentra cultivada. La lista de especies se puede encontrar en el *anexo 1: Caracterización de la zona de estudio*.



Fig. 7: Vista de la cobertura de la cuenca desde Castro del Río. (Obtenido de www.ayuntamientocastrodelrio.org)

FAUNA

La fauna de la cuenca del arroyo de las Canteras está limitada ya que no existen masas arboladas ni suficiente superficie con vegetación natural. La mayoría de la cuenca está cubierta por Olivar a suelo desnudo. El ecosistema dominante en la cuenca es el ecosistema de campiña. La lista de especies se puede encontrar en el *anexo 1: Caracterización de la zona de estudio*.

ESTADO SOCIOECONÓMICO

Castro del Río es una localidad de la provincia de Córdoba, Andalucía, España. Su extensión superficial es de 218 km² y tiene una densidad de 37,1 hab/km². Se encuentra a una altitud media de 227 metros y a 42 km de la capital de provincia, Córdoba.

El año 2008 contaba con 8.114 habitantes, posee una tendencia ligeramente al alza debido a la inmigración.

Con respecto a la distribución de la población según grupos de edad, más de la mitad de la población se encuentra en edad comprendida entre 18 y 65 años, siendo equiparable el número de menores de edad y ancianos. En cuanto al empleo y nivel de renta, de la población del municipio de Castro del Río, el 43% pertenecen al grupo de la Población Activa, de las cuales una de cada tres está en paro.

La distribución de la población según el sector laboral corresponde a un 42% en el sector servicios, seguido de un 30% al sector primario, un 19% a la construcción y un 9% al sector secundario. Dentro del sector primario, la actividad mayoritaria es el cultivo del olivar.



3. ESTUDIO HIDROLÓGICO

Para elegir el caudal a modelizar hay que tener en cuenta el criterio que establecen los Organismos competentes en materia hidrológica para establecer el periodo de retorno adecuado para adaptar la actuación, en este caso la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir ($T = 500$ años). En cuanto a normativa, es de aplicación la Instrucción 5.2.IC, Orden de 14 de Mayo de 1.990 del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.

Se han calculado, mediante el Método Racional Modificado de Témez, los caudales asociados a los periodos de retorno de 500, 200, 100, 50 y 20 años, los parámetros necesarios para su cálculo y el caudal resultante son los siguientes:

Parámetros comunes al cálculo de caudal para todos los periodos de retorno:

- Tiempo de concentración (T_c) = **1,974 h**
- $P_0 = 18,78 \cdot 2,8 = 52,584 \text{ mm} \rightarrow \mathbf{25 \text{ mm}}$ (Según las recomendaciones de la D.P. Córdoba)
- Coef. Corrector: **2,8** (adimensional)
- $I_1/I_d = \mathbf{8,5}$ (adimensional)
- Coeficiente de corrección de Témez aplicado a Q (K'): **1,1432** (adimensional)

Tabla 1: CAudales resultantes según el periodo de retorno. Elaboración propia

Periodo de retorno (años)	Precipitación máxima diaria (mm/día)	Coeficiente de escorrentía*	Intensidad media horaria de precipitación (mm/h)	Q (m ³ /s)
500	140	0,406 0,6	31,378	53,46
200	122	0,406 0,6	27,658	46,59
100	109	0,367 0,6	24,711	41,62
50	96	0,324 0,6	21,763	36,66
20	81	0,269 0,6	18,363	30,93

*Al no admitirse valores para el coeficiente de escorrentía menores a 0,6 según las recomendaciones de la Diputación Provincial de Córdoba, se tomará como 0,6 el valor de C .

4. ESTUDIO HIDRÁULICO

Para poder diseñar correctamente la simulación de caudales en las diferentes secciones mediante HEC-RAS, ha sido necesaria la toma de datos en campo y la realización de un levantamiento topográfico.

Se ha utilizado una “n” de Manning para la zona del canal de 0,013 y a la llanura de inundación un 0,03. Para la zona naturalizada, la anterior al canal, se dará un valor de “n” de Manning para el cauce principal de 0,027 y para la llanura de inundación un 0,03. Para finalizar, se introduce la pendiente media del tramo: 0,011m/m; y el caudal utilizado: 53,46 m³/s

Se ha dividido el tramo de estudio en 6 zonas según el comportamiento del agua y la topografía del terreno:

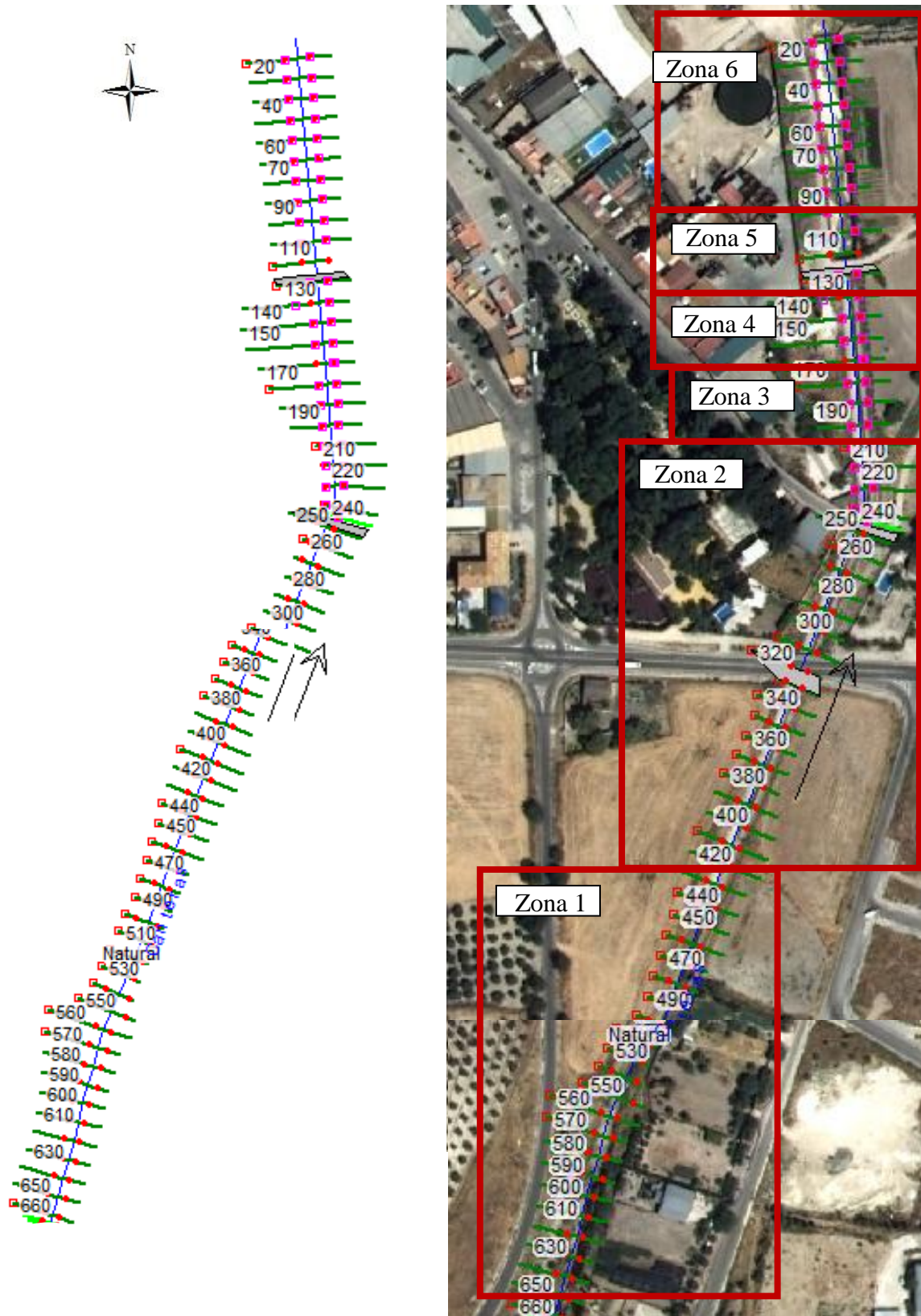


Fig. 8: Zonificación del tramo. Elaboración propia



Las gráficas y los análisis completos de los resultados para la circulación de un caudal asociado a un periodo de retorno de 500 años se encuentran en el *anejo 2: Estudio hidrológico e hidráulico*.

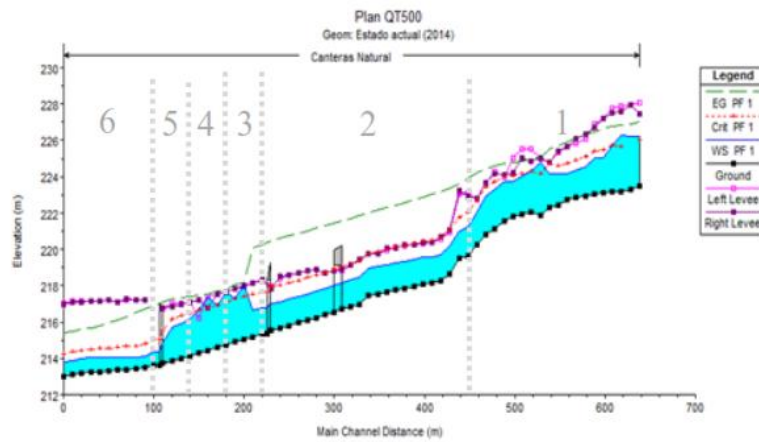


Fig. 9: Perfil longitudinal del tramo de actuación con cota de lámina de agua. Obtenido de HEC-RAS

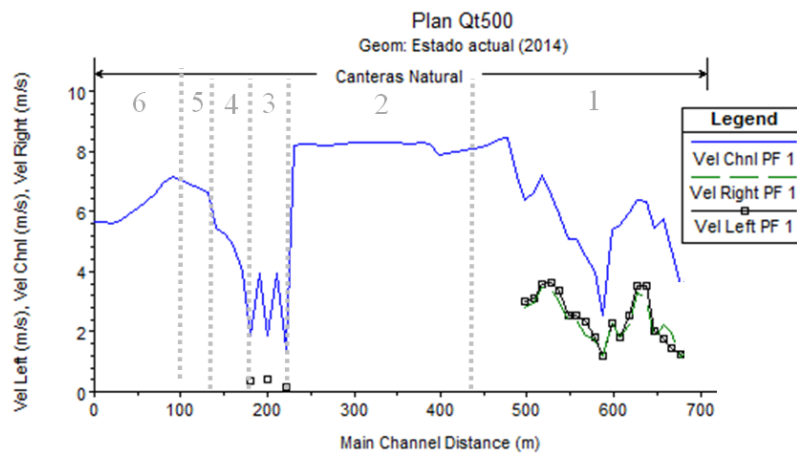


Fig. 10: Gráfico de velocidades para el tramo de estudio. Obtenido de HEC-RAS

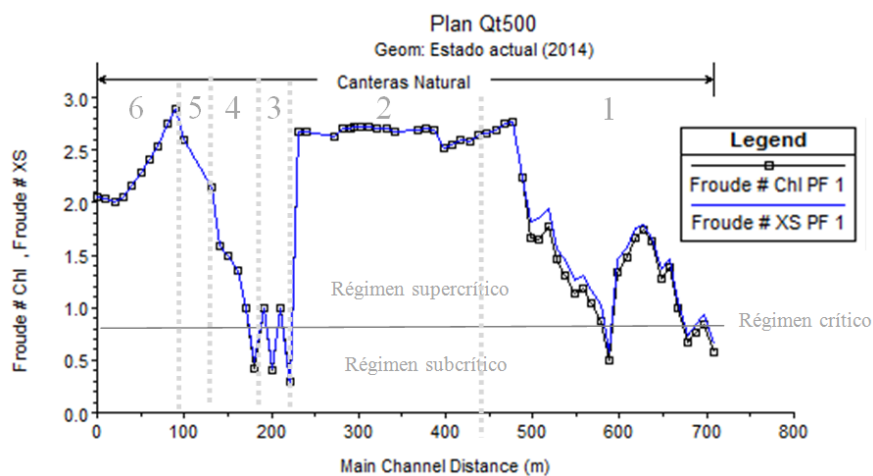


Fig. 11: Gráfico del número de Froude. Obtenido de HEC-RAS



Tabla 2: Resumen de resultados según zonificación. Elaboración propia

Zona	Secciones	Velocidades (m/s)	nº de Froude	Desbordamiento
1. Tramo sin canalizar	660 - 440	2,1 - 8,1	0,5 - 2,7	No
2. Tramo de canal trapezoidal recto	440 - 220	7,9 - 8,0	2,5 - 2,7	No
3. Tramo inmediatamente posterior a la curva	220 - 180	1,7 - 4,0	0,3 - 1,0	Si
4. Último tramo de canal trapezoidal	180 - 140	2,0 - 5,2	0,4 - 2,1	No
5. Paso de canal trapezoidal a rectangular	140 - 100	4,2 - 6,4	2,0 - 2,5	No
6. Canal rectangular	100 - 0	5,6 - 7,0	1,9 - 2,8	No

4.1. ESTUDIO DE LA ZONA DE LA CURVA DEL CANAL

Las secciones que dan problemas y no abarcan el caudal asociado al periodo de retorno de 500 años son los perfiles 180, 200 y 220, correspondientes a la zona posterior de la curva que desarrolla el canal. En la siguiente imagen se muestra, señalada en rojo, la parte de canal en la que se producen desbordamientos y la zona afectada por las inundaciones.



Fig. 12: Zona de desbordamiento producido con el caudal T500. Obtenido de Google Earth



Esta curva tiene un radio de 50 m. Utilizando la fórmula de la US Corps of Engineers para el cálculo de la sobreelevación del agua en la parte exterior de las curvas, se obtiene que esta sufre una sobreelevación de 0,7 metros.

Se necesitará cambiar el trazado del canal, tanto el trazado en planta como las secciones y la pendiente para poder solventar el problema y que no se produzcan desbordamientos ni grandes erosiones.

5. ESTIMACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA Y EMISIÓN DE SEDIMENTOS

Este estudio se ha basado en la implementación de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Modificada (MUSLE) para calcularla cantidad de sedimentos emitidos debido a un aguacero asociado a un periodo de retorno de 500 años en la cuenca hidrográfica del arroyo de las Canteras. Se toma un periodo de retorno de 500 años ya que es el valor indicado por la administración para la realización de obras en zonas de dominio público hidráulico que afecten a núcleos de población. Así se obtendrá un nivel de seguridad suficiente frente a inundaciones.

Los resultados obtenidos muestran que la erosión en la cuenca produce una pérdida de una gran cantidad de toneladas de suelo por aguacero, principalmente debido a la ausencia de cobertura vegetal densa, ya que casi la totalidad de la cuenca se encuentra cubierta por olivar de secano con prácticas de laboreo a suelo desnudo todo el año.

Para la realización de este estudio se ha partido de información de diferentes capas digitales. Todas ellas proyectadas en el sistema de coordenadas ETRS89, UTM Huso 30.

- Modelo Digital del Terreno (tamaño de celda: 5x5 metros).
- Mapa litológico nacional a escala 1:50.000. (MAGNA50).
- Capa vectorial de líneas con la red hidrográfica y curvas de nivel de España. (BCN25) (Escala 1:25.000).
- Capa vectorial de polígonos SIOSE (usos del suelo).
- Mapa edafológico digital (1:1.000.000), editado en el año 2001 por el Sistema Español de Información de Suelos.

Para implementar la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Modificada (MUSLE), se ha calculado por separado cada uno de los factores que la integran, ayudados de la cartografía digital utilizada en ArcGis y mediante una serie de operaciones, dando como resultado un valor para cada factor requerido.

$$Y = 11,8. (V. Q_p)^{0,56} . K. C. P. LS$$

K: Factor erosionabilidad del suelo

C: Factor usos del suelo

P: Factor prácticas de conservación del suelo

LS: Factor topográfico

K: FACTOR EROSIONABILIDAD DEL SUELO

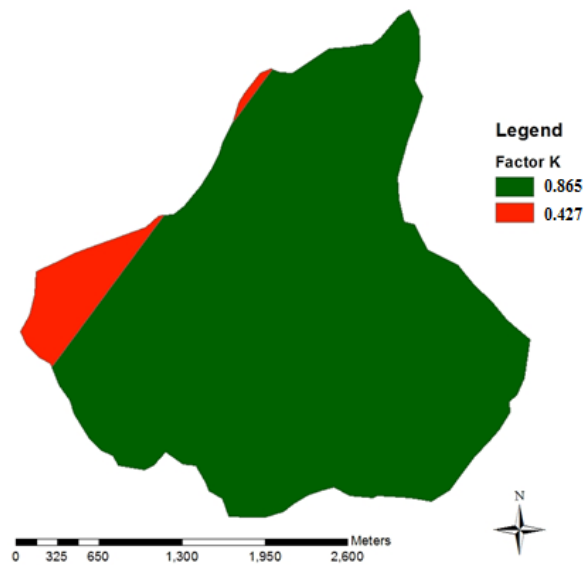


Fig. 13: Mapa de valores del factor “K” de la cuenca del arroyo de las Canteras. Elaboración propia

Valor medio del factor “K” en la cuenca = 0,45

C: FACTOR USOS DEL SUELO

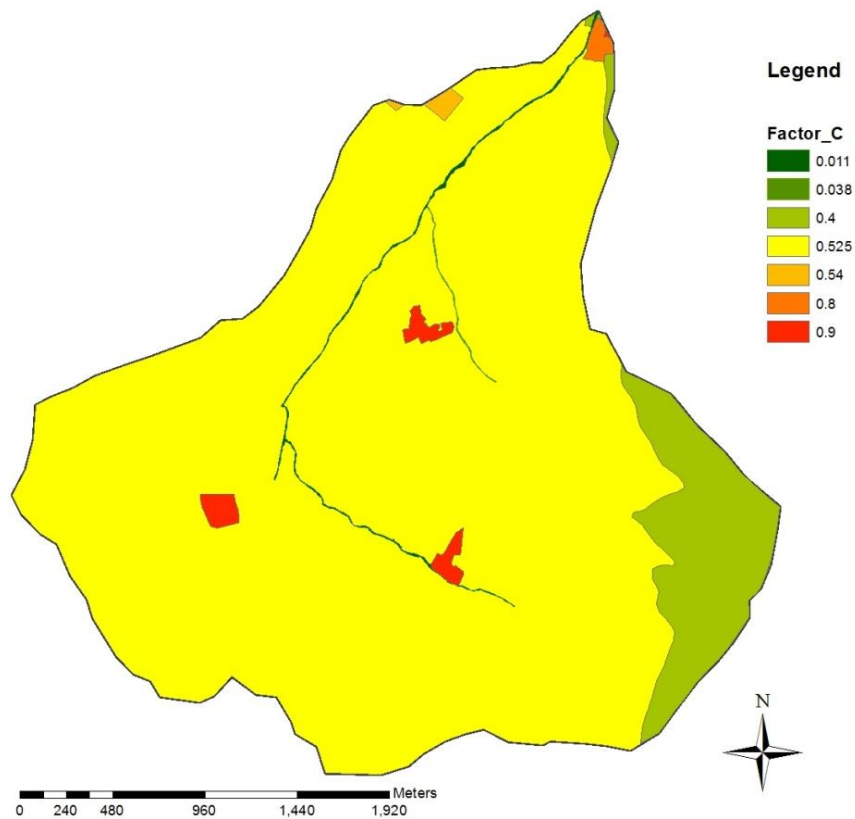


Fig. 14: Mapa de valores del factor “C” de la cuenca del arroyo de las Canteras. Elaboración propia.

Valor medio del factor “C” en la cuenca = 0,516

P: FACTOR PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DEL SUELO

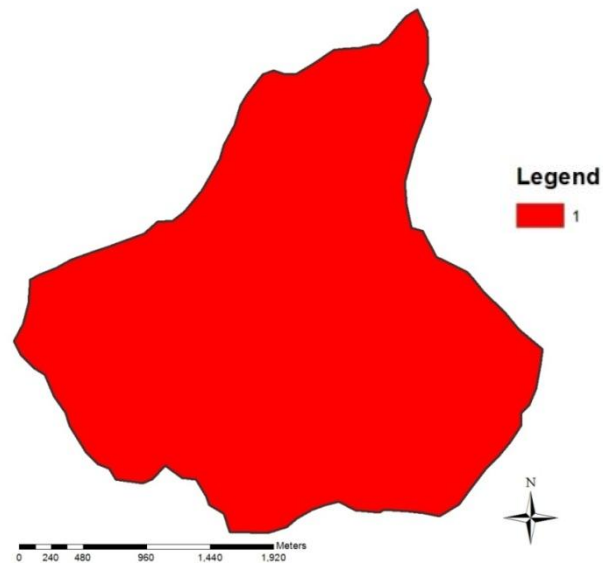


Fig. 15: Mapa de valores del factor “P” de la cuenca del arroyo de las Canteras. Elaboración propia

Valor medio del factor “P” en la cuenca = 1

C: FACTOR TOPOGRÁFICO

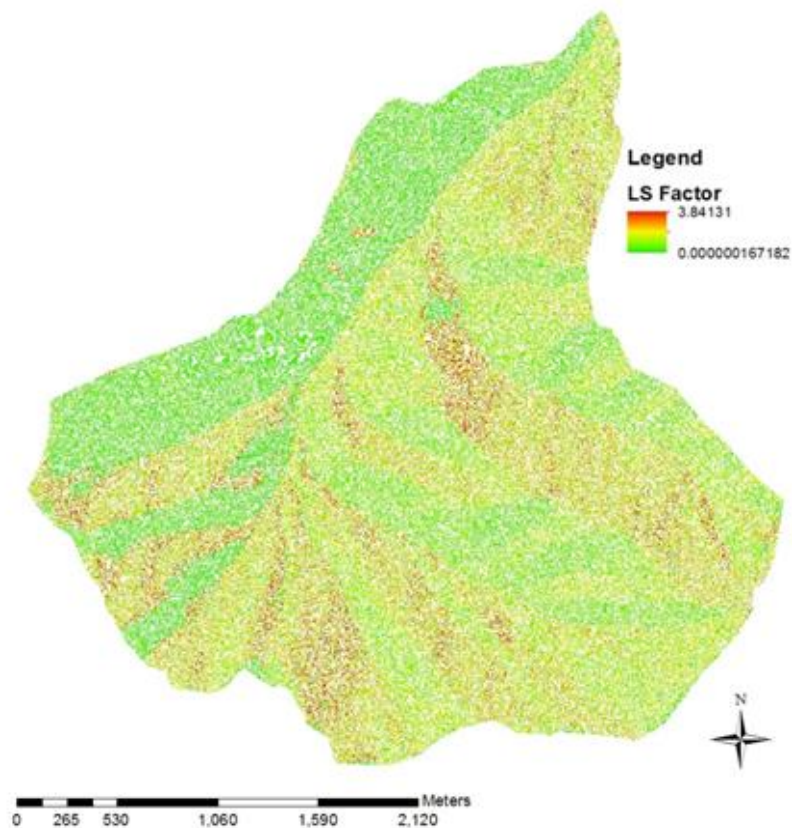


Fig. 16: Mapa de valores del factor “LS” en la cuenca del arroyo de las Canteras. Elaboración propia.

Valor medio del factor “LS” en la cuenca = 1,22



- Volumen de escorrentía: $V = 561.870 \text{ m}^3$ (Calculada en el anejo 3, apartado 4.2.1. *Cálculo del volumen de escorrentía (V), mediante la fórmula $V = P.Ce.S$*)
- Caudal instantáneo máximo: $Q_p = 53,46 \text{ m}^3/\text{s}$ (Calculado con Maxpluwin)

Sustituyendo estos valores en la ecuación de la MUSLE, resulta una cantidad de:

$$Y = 11,8. (V. Q_p)^{0,56} * 0,283284 = 51.475 \text{ toneladas / aguacero}$$

A la vista de los resultados obtenidos la cuenca del arroyo de las Canteras presenta un conjunto de características naturales que la configuran como una zona de gran erosión hídrica, sin embargo, las altas velocidades que se alcanzan en el tramo de estudio evitan que se produzca sedimentación y exista una alta erosión e incisión en el cauce.

6. PROPUESTA DE SOLUCIONES TECNICAS Y JUSTIFICACION

El objetivo de este proyecto es encontrar una solución a los problemas de falta de naturalidad e inundaciones que se producen en el cauce del arroyo de las Canteras a su paso por la localidad de Castro del Río debido a que los últimos 440 metros de arroyo se encuentran canalizados.



Fig. 17: Visión de la falta de naturalidad del arroyo debido al canal. Fotografía propia (Junio 2014)

Ya que se requiere la retirada de todo el hormigón del tramo, este anejo hará hincapié en los problemas de erosión, estabilidad de la obra y desbordamientos.

Para solucionar estos problemas, se pueden diseñar diversas actuaciones según el tipo de actuación y el caudal circulante



6.1. ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES DENTRO DE LA ZONA DE ESTUDIO

ALTERNATIVAS PARA UN CAUDAL ASOCIADO A UN PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS

Se van a diseñar distintas alternativas que toleran el caudal asociado a un periodo de retorno de 500 años:

6.1.1. ALTERNATIVA 1: AUMENTO DE LA ALTURA DEL MURO

La alternativa más sencilla consiste en el aumento de la altura y grosor del muro que bordea el canal para evitar el desbordamiento. Según el estudio realizado en el “*anejo 4: Propuesta de soluciones técnicas y justificación*”, simplemente elevando el muro 30 cm durante los 40 metros problemáticos es suficiente para que al realizar la modelización con HEC-RAS no se desborde el canal.

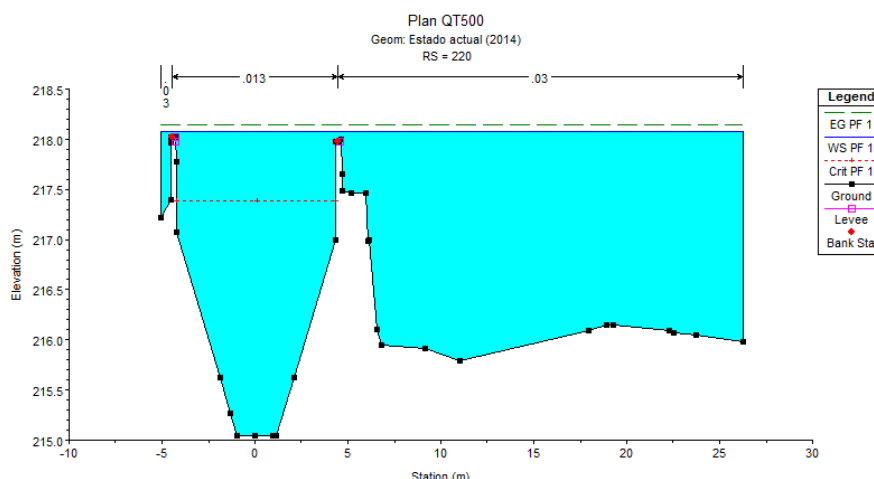


Fig. 18: Detalle del desbordamiento en el perfil 220 con altura de muro actual. Obtenido de HEC-RAS

Sin embargo, esta solución, a pesar de ser la más económica y rápida de ejecutar, estética y ecológicamente no es una solución adecuada, ya que no se pretende únicamente evitar el desbordamiento, sino que en la restauración, la parte ambiental tiene un gran peso.

6.1.2. ALTERNATIVA 2: RESTAURACIÓN DEL ANTIGUO CAUCE

Una alternativa que suele ser eficaz en la restauración de ríos y arroyos que se encuentran canalizados consiste en llevar el caudal por su antiguo cauce. En este caso, el antiguo cauce del arroyo de las Canteras fue desplazado con la creación del canal. Para poder saber cual era este antiguo cauce, se recurre a Ortofotografía aérea con fecha anterior a la creación del canal.

Comparando antes y después de la canalización se verifica que no se puede devolver al arroyo su trazado natural ya que el antiguo cauce se encuentra actualmente urbanizado. Se descarta la opción de recuperar el antiguo cauce y se deberá recurrir a otra solución.



Fig. 19: Comparación de cauce natural y cauce canalizado. Fuente: Google Earth

6.1.3. ALTERNATIVA 3: RETIRADA DE HORMIGÓN Y REDIMENSIONAMIENTO DEL CAUCE ACTUAL

Con la retirada de la solera del canal, el terreno se queda desprotegido contra la erosión que producen las altas velocidades que lleva el agua, por lo tanto hay que redimensionar el cauce para poder hacer frente a este problema y evitar los desbordamientos.

Para modificar un cauce se pueden realizar 3 tipos de cambios: Modificar las secciones, modificar el trazado en planta y modificar la pendiente.

MODIFICACIÓN DE LAS SECCIONES Y TRAZADO EN PLANTA

Para poder solucionar el problema de los desbordamientos, y a la vez poder retirar el hormigón del canal para dotar al tramo de cierta naturalidad, es necesario aumentar la sección y tender los taludes para disminuir la velocidad, el calado y el cortante para evitar una elevada erosión, protegiendo además lecho y taludes con los medios adecuados.

Con respecto a la rugosidad, en lecho se tomará un valor de 0,028 (“Dragline-excavated or dredged” - No vegetation) y para los taludes 0,05 (“Brush” – Light brush and trees)

Se han diseñado 4 secciones tipo diferentes para la restauración del tramo canalizado en función de la zona en la que se encuentran, la altura de lámina de agua y el espacio disponible. Para la obtención del diseño óptimo de estos, se ha seguido la técnica de prueba y error, modelizando con distintos modelos hasta obtener los diseños siguientes localizadas en el trazado en planta.

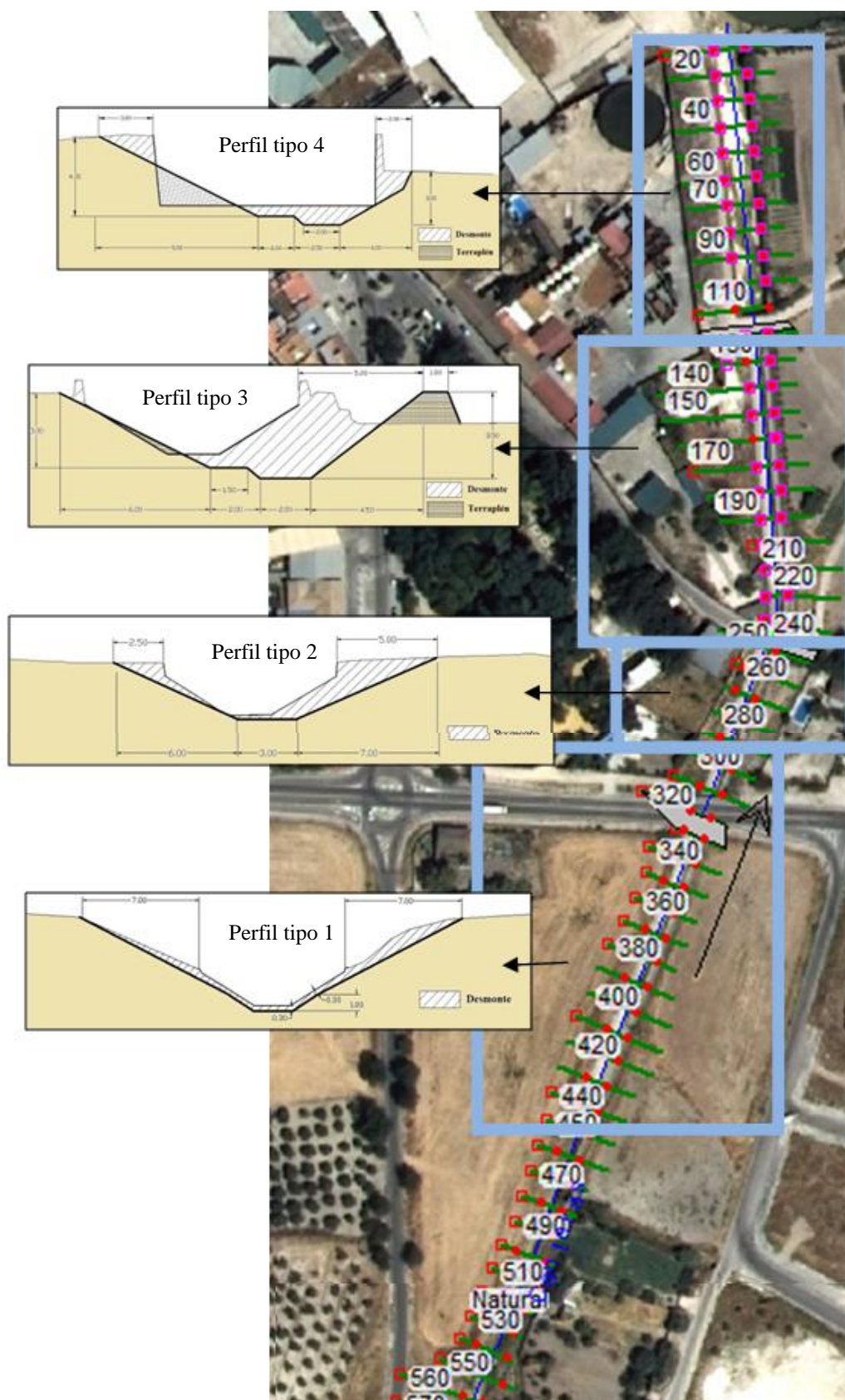


Fig. 20: Zonificación de los nuevos perfiles. Elaboración propia



En la figura anterior se muestran los distintos perfiles tipo que se han diseñado para cada zona. Los detalles de cada tipo uno de ellos vienen dados en el “*anejo 4: Propuesta de soluciones técnicas y justificación*”.

MODIFICACIÓN DE LA ZONA DE LA CURVA

Una vez pasado el puente, ya que la curva del canal es problemática con respecto a los desbordamientos, se dará un nuevo trazado en planta ampliando al máximo posible el radio de la curva para una mayor seguridad en cuanto a la protección frente a desbordamientos.

Ya que el cambio de dirección es inevitable en este canal, se ha diseñado el nuevo radio que tendrá la curva, resultando un radio mínimo necesario de 70 metros.

- **ALTERNATIVA CURVA 1**

Para dar cierto margen de seguridad se ha diseñado una nueva curva de 100 metros de radio, indicada en la siguiente figura:

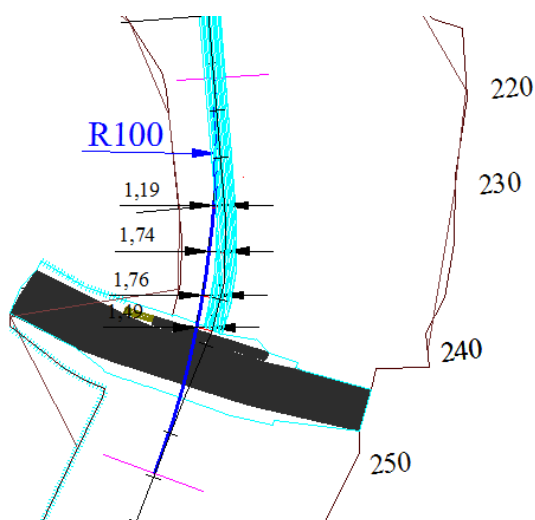


Fig. 22: Nuevo diseño de la curva del canal (en azul oscuro). Elaboración propia

Esta nueva curva sería la ideal para solventar el problema, sin embargo no se puede realizar ya que afecta a la estructura del puente y no se dispone de terreno disponible a la izquierda del cauce para poder desplazarlo hacia ese lado.

- **ALTERNATIVA CURVA 2**

Como alternativa a la anterior curva, se ha decidido modificar no solo el radio de la curva, sino que se ha desplazado el tramo posterior ligeramente a la derecha para generar varias curvas consecutivas con radio mucho mayor para generar unas condiciones de flujo más uniformes.

Las características de dichas curvas se pueden ver en la siguiente figura y a continuación de ella.

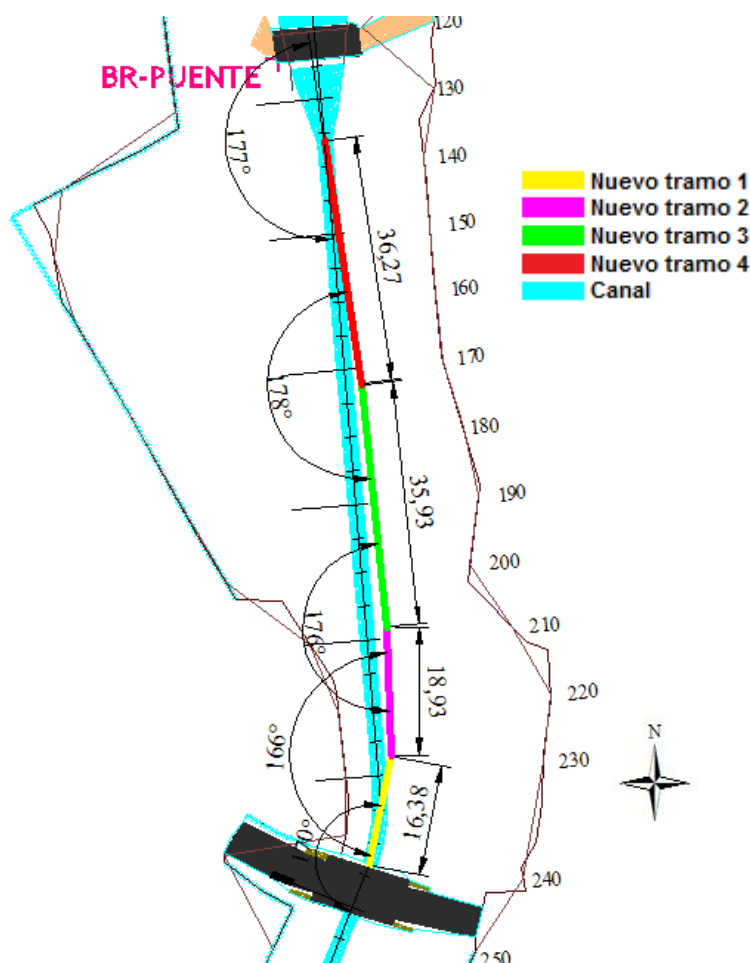


Fig. 23: Variación del trazado en planta (Nueva curva). Elaboración propia

- Entre el cauce antiguo del canal y trazado del nuevo tramo 1 hay una curva de 200 m de radio. $\Delta y = 0,12$ metros
- Entre el trazado del nuevo tramo 1 y el nuevo tramo 2 hay una curva de 100 m de radio. $\Delta y = 0,23$ metros
- Entre el trazado del nuevo tramo 2 y el nuevo tramo 3 hay una curva de 160 m de radio. $\Delta y = 0,14$ metros
- Entre el trazado del nuevo tramo 3 y el nuevo tramo 4 hay una curva de 300 m de radio. $\Delta y = 0,07$ metros
- Entre el trazado del nuevo tramo 4 y el trazado antiguo del canal hay una curva de 300 m de radio. $\Delta y = 0,07$ metros

Todos estos valores de sobreelevación de la cota de lámina de agua en las curvas son completamente admisibles y por lo tanto se soluciona el problema producido por la anterior curva.

Con las nuevas condiciones descritas se ha comprobado si se podrán producir desbordamientos en el tramo y se verifica que, efectivamente, el caudal se comporta



correctamente y no se producirán problemas de desbordamientos, sin embargo, las velocidades siguen siendo muy altas y se necesita reducir la pendiente.

CAMBIO DE PERFIL LONGITUDINAL

Para obtener unos mejores resultados hay que variar el perfil longitudinal. El perfil del tramo antes de la actuación es muy uniforme, con una pendiente muy acusada.

Para modificarlo, una vez retirado el hormigón, se creará un salto de 80 cm después del segundo puente, en la zona de la curva, para conseguir reducir la pendiente y disipar energía en la zona.

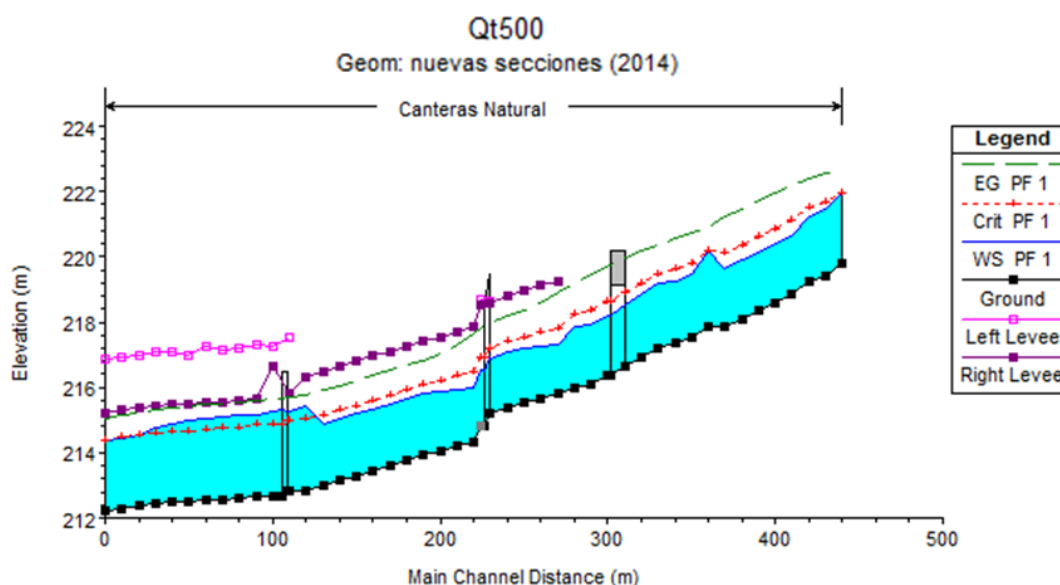


Fig. 24: Pendiente del tramo después de la actuación. Obtenido de HEC-RAS.

Las velocidades que se van a alcanzar en el tramo una vez realizada la actuación quedan reflejadas en la siguiente gráfica:

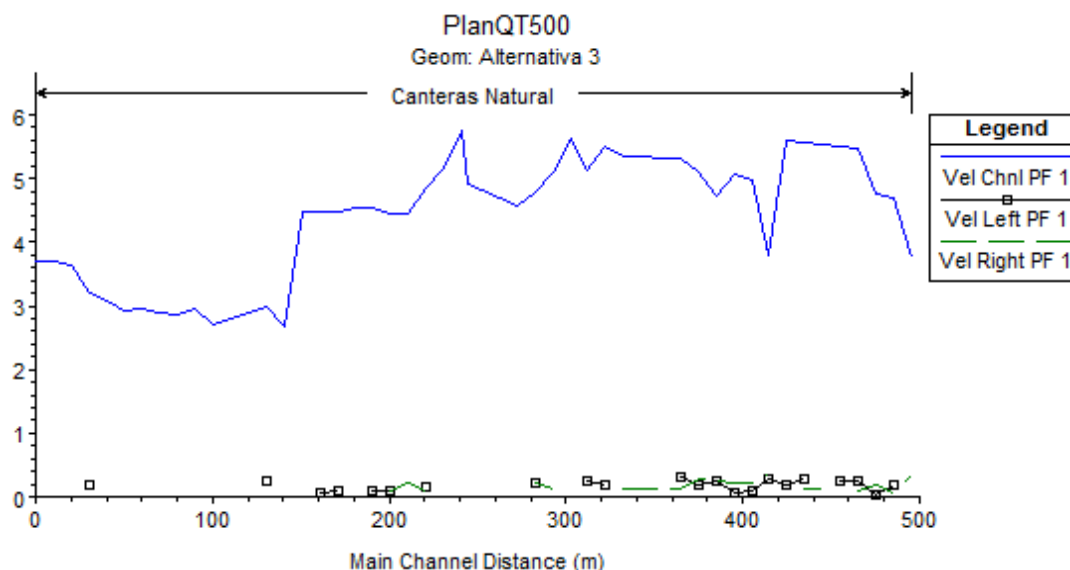


Fig. 25: Velocidades del tramo después de la actuación. Obtenido de HEC-RAS



Ya que las velocidades son muy altas para un cauce sin revestimiento (un lecho de rocas duras aguanta un máximo de 4,5 m/s), hay que recurrir a otra alternativa.

6.1.4. ALTERNATIVA 4: MODIFICACIÓN DEL TRAZADO Y CREACIÓN DE SALTOS

Para intentar reducir la velocidad lo máximo posible con el caudal del periodo de retorno de 500 años, se recurrirá a una variación radical de la pendiente, ya que no hay espacio disponible para reducir la pendiente creando meandros, esta tendrá que reducirse mediante la creación de una serie de saltos con la consiguiente reducción de la pendiente en los tramos intermedios a ellos.

Se han creado 5 saltos de 1 metro de altitud aproximadamente dando como resultado el siguiente perfil:

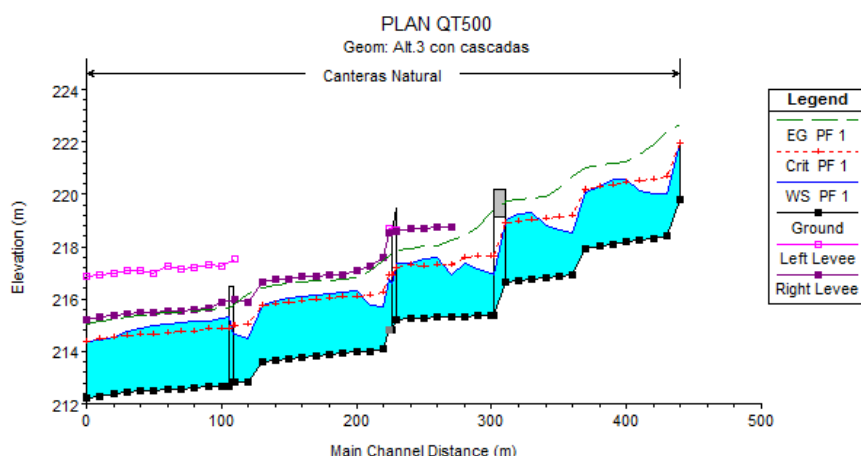


Fig. 26: Pendiente del tramo después de la actuación. Obtenido de HEC-RAS

El perfil longitudinal ha pasado de tener una pendiente de 0,011 m/m a estar formado por cinco tramos con pendiente de 0.004 m/m separados entre sí por saltos de un metro de altura aproximadamente.

Con este nuevo perfil de pendiente reducida y existencia de saltos, las gráficas de velocidades y número de Froude son las siguientes:

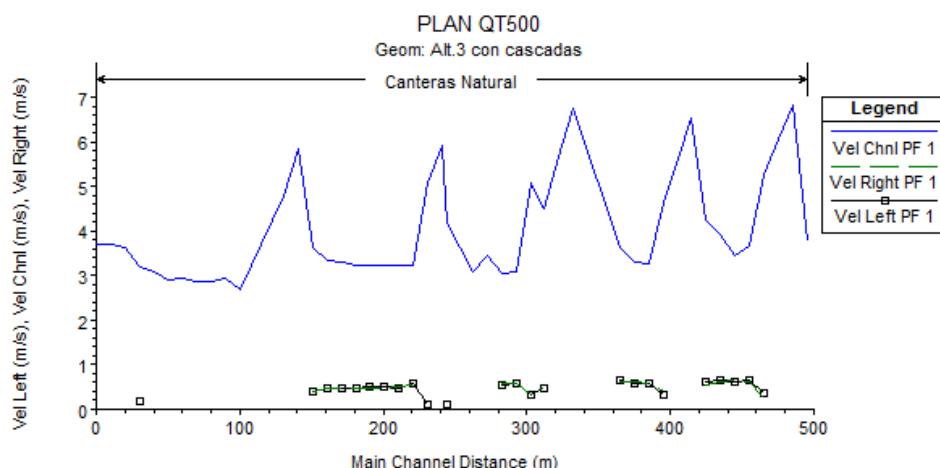


Fig. 27: Gráfico de velocidades del tramo después de la actuación. Obtenido de HEC-RAS.

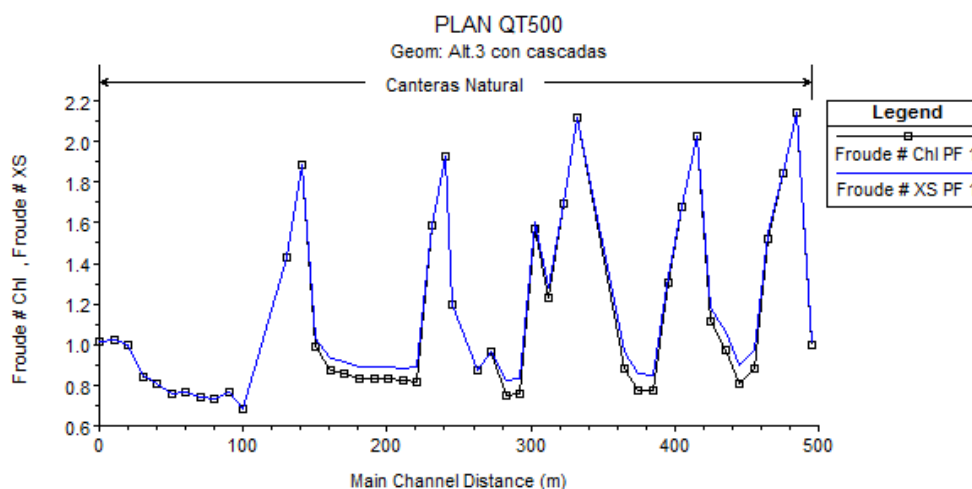


Fig. 28: Gráfico de “n” de Manning en el tramo después de la actuación. Obtenido de HEC-RAS

Se verifica que esta alternativa es mucho más factible que la anterior ya que se limitan los picos de altas velocidades a únicamente aguas abajo de cada salto.

Se puede apreciar que en estas zonas se produce un paso de régimen rápido a régimen lento de forma brusca con una importante disipación de energía. Para garantizar la estabilidad del lecho en estas zonas aguas abajo de los saltos habría que crear un cuenco de disipación que reduzca adecuadamente la energía del agua, realizada con materiales resistentes a velocidades que rondan los 6 m/s.

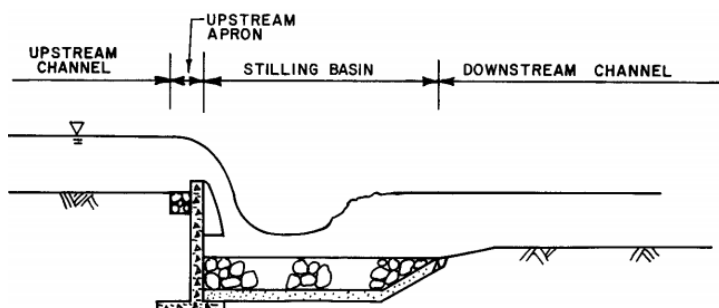


Fig. 29: Ejemplo de disipador de energía aguas abajo del salto. Obtenido de “Boulder County, Storm Drainage Criteria Manual. 1982”

Esta alternativa es mucho más viable que la anterior ya que se limitan los picos de altas velocidades a zonas concretas únicamente aguas abajo de cada salto, sin embargo, hay que reducir el caudal para evitar que el puente de la Nacional 432 entre en carga.

ALTERNATIVAS PARA UN CAUDAL ASOCIADO A UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS

Ya que con el caudal de 500 años resultan unas velocidades demasiado altas se ha modelizado con el caudal del periodo de retorno de 100 años para contrastar ambos resultados.



6.1.5. ALTERNATIVA 5: ALTERNATIVA 4 CON Q_{T100}

En esta alternativa se ha probado a modelizar la alternativa 4 con un periodo de retorno de 100 años en lugar de 500. Este caudal es $41,62 \text{ m}^3/\text{s}$, en comparación con los $53,46$ del periodo de retorno de 500 años, siendo un periodo de retorno 5 veces mayor, el caudal es solo un 30 % mayor.

Con respecto a la cota de lámina de agua, con un caudal máximo de periodo de retorno de 100 años, esta es unos 40 centímetros menor que con un caudal asociado a un periodo de retorno de 500 años. Las velocidades sufren una reducción prácticamente nula y el número de Froude se mantiene igual que con Q_{T500} .

La única diferencia notable es que el primer puente correspondiente a la carretera nacional N-432 no entra en carga como con Q_{T500} .

Las velocidades sufren una reducción prácticamente nula y el número de Froude se mantiene igual que con Q_{T500} .

Estas afirmaciones se pueden comprobar en los siguientes gráficos comparativos tanto de velocidades como del número de Froude :

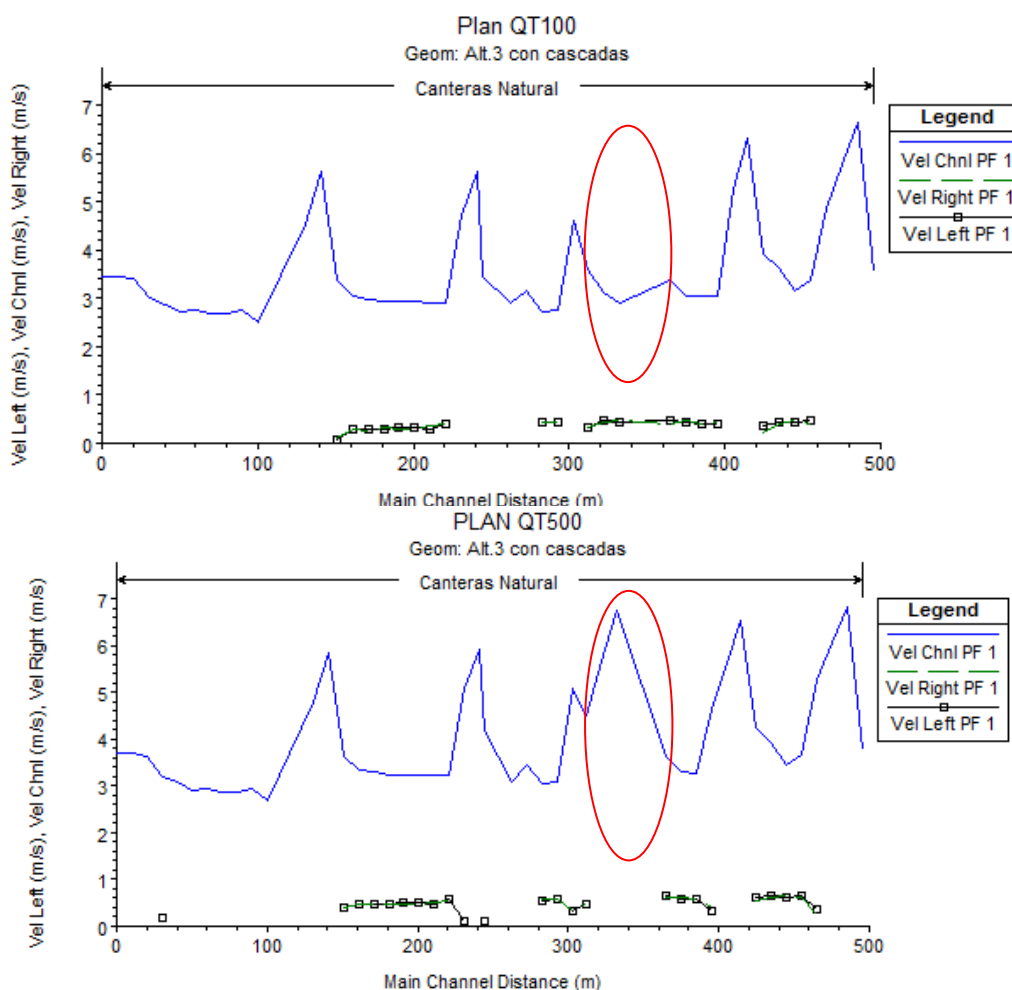


Fig. 30: Comparación de velocidades en el tramo de la alternativa 4 con Q_{T100} . Obtenido de HEC-RAS

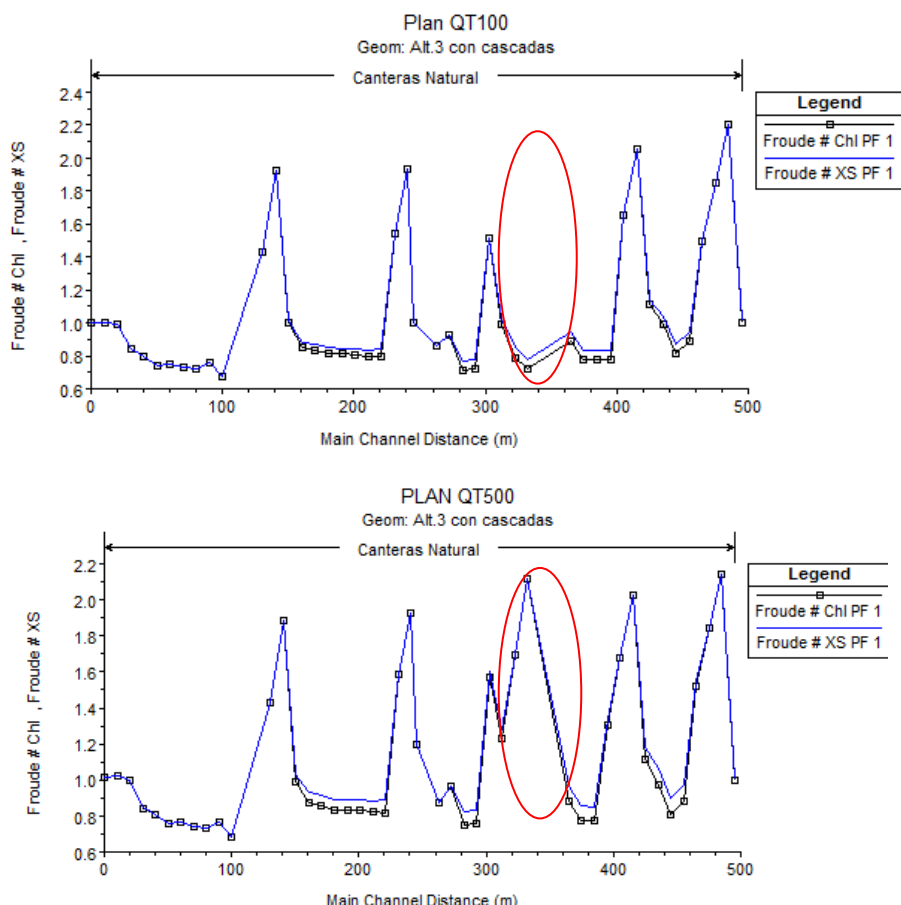


Fig. 31: Comparación de n° de Froude en el tramo de la alternativa 4 con Q_{T100} . Obtenido de HEC-RAS

CAUDAL MÁXIMO CON EL CUAL EL PRIMER PUENTE NO ENTRA EN CARGA

Viendo que con el caudal asociado al periodo de retorno de 500 años el puente entra en carga, se analiza con qué caudal exacto el puente deja de tener ese problema ya que éste no puede inundarse ni ser dañado ya que tiene un tráfico importante al ser una carretera nacional.

Mediante el estudio realizado en el *anejo 4: Propuesta de soluciones técnicas y justificación*, el caudal máximo con el cual el puente no entra en carga es $44 \text{ m}^3/\text{s}$ y se corresponde a un periodo de retorno de 135 años.

6.1.6. ALTERNATIVA 5: MODIFICACIÓN DEL TRAZADO Y CREACIÓN DE SALTOS (OPCIÓN 2)

Otra alternativa para evitar que el puente entre en carga consiste en cambiar la localización de los saltos, situándolos justo antes de los puentes para que la caída del agua se produzca en la base del puente, la zona que tiene que crear turbulencias para disipar energía. De esa forma los disipadores de energía tendrán además la función de proteger la base de los puentes, sin embargo, es adecuado conseguir rebajar el caudal punta que llega al tramo de estudio.



6.2 ALTERNATIVAS CON MEDIDAS ESTRUCTURALES FUERA DEL TRAMO

Ya se han propuesto diversas medidas dentro del cauce en el tramo problemático pero actuando únicamente en el tramo no se consigue solucionar el problema totalmente. Es necesario conseguir reducir el caudal, evitar las altas velocidades y reducir la cota de lámina de agua para evitar que el puente de la nacional 432 entre en carga y que entre la cota inferior del tablero y el nivel del agua exista espacio suficiente para que objetos flotantes como troncos que arrastre la avenida, etc. no alcancen dicho tablero y se produzcan problemas de desbordamientos.

Las medidas expuestas a continuación en este apartado se combinarán con las anteriores.

6.2.1. CONSTRUCCIÓN DE DIQUES DE LAMINACIÓN

Con la instalación de diques de laminación, se reduce y desfasa el pico de caudal máximo de una avenida ya que esta se almacena y se va liberando poco a poco. Esta reducción depende de la superficie de espejo del agua.

Un dique de laminación consiste en un dique cuya finalidad es la de retener agua temporalmente realizando una laminación “forzada” y más eficaz. El dique no se construye impermeable, sino cubierto una serie de mechinales, (conductos que atraviesan la masa del dique, a distintas alturas, con una cierta pendiente hacia aguas abajo), que tienen por función la de colaborar al desagüe de la avenida o del caudal habitual más lentamente y drenar la cuña de sedimentos que se puedan retener con la existencia del dique.

De esta forma, con la instalación de varios diques de laminación aguas arriba del tramo se reduciría el caudal de forma suficiente para que las velocidades no sean tan elevadas y baje la cota de lámina de agua evitando la entrada en carga del puente.

6.2.2. CREACIÓN DE UNA LLANURA DE INUNDACIÓN AGUAS ARRIBA DEL TRAMO

Uno de los mayores problemas existentes en el arroyo de las Canteras es su acusado encajonamiento y su falta de llanuras de inundación, por lo que existe una nula conectividad lateral. Gracias a las llanuras de inundación, se produce efecto importante de laminación cuando hay una avenida. El agua se expande, se lamina, y se reduce su calado y velocidad.

Hay que elegir la zona de creación de la llanura en función de los riesgos potenciales que puedan darse: los que son y los que no son compatibles con los usos. Los usos compatibles suelen ser choperas, algunos tipos de cultivo o zonas sin viviendas y alejadas de núcleos urbanos que pueden inundarse fácilmente sin causar grandes



pérdidas. Las no compatibles son áreas ocupadas por viviendas y áreas recreativas, en las cuales se evitará la inundación.

Para la localización de la o las zonas para la creación de las llanuras de inundación hay que realizar un estudio preliminar combinando mapas de pendientes, de usos del suelo y localizando la zona donde menos profundidad tenga el lecho del cauce para reducir costes.

Debido al enorme encajonamiento del río, para poder crear una llanura de inundación es necesario construir un dique de laminación que haga subir el nivel del agua en la zona de creación de la zona inundable, en el caso de que el caudal sea demasiado alto. Habría que rebajar la cota del terreno a inundar por debajo de la coronación del dique para que el agua pueda salir del cauce y expandirse por dicha zona.



Fig. 32: Tramo aguas arriba de la zona de actuación del arroyo de las Canteras. Fotografía propia Noviembre 2013.

6.3. ALTERNATIVAS CON MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

Según el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, las medidas estructurales han tenido que ser complementadas con actuaciones no estructurales, aquellas que, sin actuar sobre la avenida en sí o sobre la acción del mar, modifican la susceptibilidad de la zona inundable frente a los daños por inundación. Este tipo de actuaciones son menos costosas económicamente y a la vez menos agresivas medioambientalmente.



6.3.1 MODIFICACION DE LOS USOS DEL SUELO Y PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN

El caudal de un arroyo temporal como el arroyo de las Canteras, está determinado en su mayor parte por la escorrentía producida en la cuenca.

Los factores que influyen en la escorrentía y que pueden ser modificables son: la topografía del terreno, la cual a nivel de cuenca no resulta factible económica ni ecológicamente; los usos del suelo, los cuales en este caso es casi la totalidad del terreno cultivos de olivar; y por último las practicas de conservación, que en este caso es olivar a suelo desnudo.

Para reducir la escorrentía al máximo y por lo tanto el volumen de caudal generado, lo más eficaz es modificar estos dos factores en función de la pendiente según la siguiente tabla:

Tabla 3: Pendiente máxima admisible en las tierras de cultivo. Fuente: García Nájera, J.M. (Sin fecha).

Pendiente %	Uso del suelo
< 12 %	Suelos agrícolas con buenas prácticas de cultivo
12 - (18 o 24)* %	Suelos agrícolas con prácticas importantes de conservación de suelos como terrazas o bancales. Pastizales
(18 o 24)* - 30 %	Pastizales bien conservados
> 30 %	Matorral denso Bosque

**El valor límite de la pendiente varía según el tipo de suelo, siendo los más erosionables los asociados a 18% y los menos erosionables a 24%*

Siguiendo las recomendaciones de pendiente máxima admisible para los distintos usos del suelo, se cambiarán dichos usos siguiendo el mapa usos del suelo y de pendientes anteriormente realizados en el “*anejo 1: Caracterización de la zona de estudio*”.

ZONAS CON PENDIENTE SUPERIOR AL 30%:

Ya que toda la cuenca está cubierta por olivar a suelo desnudo, se repoblarán estas zonas de acusada pendiente con arbolado y matorral autóctono con alta densidad. La repoblación deberá hacerse con encina (*Quercus ilex L.*), lentisco (*Pistacia lentiscus L.*), romero (*Rosmarinus officinalis L.*) y jara blanca (*Cistus albidus L.*) según la información de vegetación potencial obtenida en el “*anejo 1: Caracterización de la zona de estudio*”.



Fig. 33: Imagen objetivo de bosque de encina en pendiente. Obtenido de <http://barresfotonatura.com>



Se eliminarán la mitad de los olivos existentes manteniendo la otra mitad hasta que la plantación se asiente.

ZONAS CON PENDIENTE COMPRENDIDA ENTRE 20 Y 30%:

En estas zonas se mantendrán pastizales con arbolado disperso pudiendo mantenerse algún olivo y plantando un 10% de la superficie con encina.



Fig. 34: Imagen objetivo de pastizal con arbolado disperso. Obtenido de lirgbio-evolucion-iv.blogspot.com

ZONAS CON PENDIENTE INFERIOR AL 20%

En estas zonas que suponen la mayor parte de la cuenca se mantendrá el uso de cultivo de olivar con las siguientes prácticas de conservación:

Con pendientes entre **15 y 20%**, se crearán terrazas y se deberá dejar una cubierta vegetal permanente que puede ser segada en el momento de recogida de aceituna, además, se tendrán que adoptar medidas de protección en desagües. El objetivo es transformar una banda de una ladera inclinada en una terraza horizontal con el propósito de reducir la escorrentía superficial, incrementar la infiltración y, por consiguiente, también la producción agrícola.



Fig. 35: Olivar en terrazas con vegetación permanente. Obtenido de jardini-mundani.blogspot.com

Con pendientes de **10 al 15%**, se mantendrá una cubierta vegetal debiendo ser segada periódicamente antes de que entre en competencia con el olivar.



Fig. 36: Olivar con vegetación espontánea. Obtenido de www.viverossanfrancisco.es

Con pendientes del **7 al 10%**, el manejo será no laboreo, vigilando con frecuencia el estado de las malas hierbas y disponiendo las calles de plantación perpendiculares a línea de máxima pendiente.



Fig. 37: Olivar con calles de vegetación perpendiculares a la pendiente. Obtenido de www.elbancondelolivar.com



Con pendientes $<7\%$, se podrá labrar el terreno siempre y cuando sean labores superficiales (5cm) y no haya problemas de evaporación directa del suelo, evitándose la compactación del mismo por la circulación de maquinaria para mejor aireación de las raíces e infiltración del agua. En estas zonas puede dejarse el suelo desnudo ya que al no existir una pendiente importante no hay riesgo de erosión hídrica.



Fig. 38: Olivar a suelo desnudo. Obtenido de www.coralca.es

Con estas variaciones en los usos del suelo y prácticas de conservación del olivar, se reducirá el volumen de escorrentía producida en la cuenca y los caudales sólidos ya que estos son retenidos por la cubierta vegetal. Todo esto hace que el caudal punta de un aguacero sea menor.

Para dar valores a la reducción de la erosión y la escorrentía producida en la cuenca después de estas actuaciones se recurre a la MUSLE.

Según el estudio previo realizado en el “*anejo 3: Estimación de erosión hídrica y emisión de sedimentos*”, la situación actual es la siguiente:

ESTIMACIÓN DEL NUEVO VOLUMEN DE ESCORRENTÍA (V)

El volumen de escorrentía producido con la cuenca en el estado actual es de 561.870 m³, sin embargo, con los nuevos cambios en la cuenca el coeficiente de escorrentía bajaría aproximadamente hasta 0,1, generando una reducción del volumen a 123.760 m³. Esto es aproximadamente una reducción casi del 80%.

Teniendo en cuenta que el caudal del arroyo de las Canteras proviene casi en su totalidad de la escorrentía de la cuenca, se produciría una reducción muy importante en el caudal y no habría problemas de inundaciones, pudiendo hacerse una excelente restauración ecológica del arroyo.

ESTIMACIÓN DE LA NUEVA CANTIDAD DE SEDIMENTOS EMITIDA POR AGUACERO (Y)

Una vez calculada la reducción del volumen de escorrentía, se ha comparado la reducción de la cantidad de sedimentos emitida por aguacero una vez realizados los cambios en la cuenca con los que se emitirían con el estado actual.

La cantidad de sedimentos que se emitirían con una tormenta asociada a un periodo de retorno de 500 años con el estado actual de la cuenca, según se ha calculado en el *anejo 3*, es de 51.475 toneladas / aguacero.



Según el cálculo realizado en el *anejo 4: “Propuesta de soluciones técnicas y justificación”*, la cantidad de sedimentos emitida, después de los cambios en la cuenca, pasa a ser 2.138 toneladas / aguacero, es decir, una reducción de más del 95%.

Se puede corroborar, que esta alternativa es la más eficaz, ya que soluciona el foco del problema, el exceso de escorrentía en la cuenca, eliminando así problemas derivados secundarios como por ejemplo los desbordamientos producidos en el último tramo del arroyo afectando al núcleo urbano.

7. RESUMEN DE LAS ALTERNATIVAS

Para resumir las alternativas descritas se ha realizado una breve descripción, además de las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas.

MEDIDAS ESTRUCTURALES DENTRO DEL TRAMO

PARA UN CAUDAL DE PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS:

ALTERNATIVA 1: AUMENTO DE LA ALTURA DEL MURO

La primera alternativa consiste únicamente en el aumento de la altura y grosor del muro que bordea el canal dejando el resto de la estructura intacta.

Ventajas:

- Bajo coste
- Simplicidad de la obra
- Rapidez de ejecución
- Evita desbordamientos en la zona conflictiva
- No requiere expropiaciones de terreno

Inconvenientes:

- Traslada el problema aguas abajo
- No mejora la calidad ambiental
- Agrava el impacto visual de la zona

ALTERNATIVA 2: RESTAURACIÓN DEL ANTIGUO CAUCE

Esta alternativa plantea la opción rehabilitar el antiguo cauce del arroyo además de dismantelar y restaurar la zona del canal actual.

Ventajas:

- Recupera la naturalidad del arroyo
- Asegura la viabilidad del trazado ya que este no está forzado

**Inconvenientes:**

- Requiere expropiación de terreno privado
- El antiguo cauce se encuentra actualmente urbanizado

ALTERNATIVA 3: RETIRADA DEL HORMIGÓN Y REDIMENSIONAMIENTO DEL CAUCE ACTUAL

Esta alternativa se basa en la retirada del hormigón y en la modificación, dentro de lo posible, del cauce actual, tanto las secciones como el trazado en planta y en perfil.

Ventajas:

- Mejora el estado ecológico arroyo.
- Evita desbordamientos.

Inconvenientes:

- Genera elevadas velocidades y calados.
- Conlleva un elevado coste y complejidad de diseño de la actuación.
- Necesita estructuras de protección contra la erosión.
- Requiere la expropiación de una parte de terrenos privados.

ALTERNATIVA 4: MODIFICACIÓN DEL TRAZADO Y CREACIÓN DE SALTOS

Esta alternativa consiste en la alternativa anterior añadiendo una serie de saltos en el tramo justo aguas abajo de los puentes para reducir la pendiente y disipar energía.

Ventajas:

- Se reduce la velocidad y el poder erosivo del agua.
- Se mejora el estado ecológico arroyo.
- Se evitan desbordamientos.

Inconvenientes:

- Conlleva un mayor coste de ejecución y complejidad del diseño de la actuación.
- Aumenta el calado del agua.
- Produce problemas ya que el primer puente entra en carga.
- Necesita estructuras de protección contra la erosión.
- Requiere la expropiación de una parte de terrenos privados.

ALTERNATIVA 5: MODIFICACIÓN DEL TRAZADO Y CREACIÓN DE SALTOS (OPCIÓN 2)

La alternativa es igual que la anterior pero cambiando la localización de los saltos a inmediatamente aguas arriba de los puentes.

**Ventajas:**

- Aprovecha la construcción de los cuencos de disipación en la base de los puentes para protegerlos de la erosión
- El puente no entra en carga
- Reduce la velocidad y el poder erosivo del agua
- Mejora el estado ecológico arroyo
- Evita desbordamientos

Inconvenientes:

- Conlleva un mayor coste de ejecución y complejidad del diseño de la actuación.
- Aumenta el calado del agua.
- Necesita estructuras de protección contra la erosión.
- Requiere la expropiación de una parte de terrenos privados.

PARA UN CAUDAL DE PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS:**ALTERNATIVA 6: ALTERNATIVA 4 CON CAUDAL T100**

Esta alternativa se ha estudiado únicamente para comparar el comportamiento de la alternativa 4 con un caudal asociado a un periodo de retorno de 500 años y con uno de 100 años.

Ya que la zona es urbana no se considera posible una alternativa que funcione únicamente para un periodo de retorno de 100 años.

MEDIDAS ESTRUCTURALES FUERA DEL TRAMO**INSTALACIÓN DE DIQUES DE LAMINACIÓN**

Esta medida consiste en la construcción de una serie de diques de laminación aguas arriba del tramo.

Ventajas:

- Reducen el caudal punta de las avenidas.
- Reducen la velocidad y calado del agua que llega al tramo de estudio.
- Permiten la circulación del agua.
- Evitan desbordamientos.
- Pueden reducir la pendiente aguas arriba de su localización.
- No requiere expropiación de terreno.

Inconvenientes:

- Conllevan un elevado coste de ejecución y complejidad de diseño.
- Suponen un obstáculo impidiendo la conexión longitudinal del arroyo.
- Suponen una trampa de sedimentos.



CREACIÓN DE UNA LLANURA DE INUNDACIÓN ARTIFICIAL

Con esta medida se pretende habilitar una zona como llanura de inundación artificial, se requerirá de la instalación de un dique por cada salida de agua del cauce ya que este posee una elevada incisión y la cota de lámina de agua no supera la sección creada por la erosión.

Ventajas:

- Laminación de avenidas
- Mejora del estado ecológico de la zona
- Mejora de la conexión lateral del arroyo
- Reducción de poder erosivo aguas abajo

Inconvenientes:

- Complejidad de diseño y buen funcionamiento
- Impedimento de la conexión longitudinal del arroyo

MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

CAMBIOS EN LOS USOS DEL SUELO Y PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN

Las medidas no estructurales propuestas son el cambio de usos del suelo en la cuenca y las prácticas de conservación del olivar.

Ventajas:

- Reducción importante de la escorrentía
- Incremento de la infiltración y la calidad de las aguas
- Reducción de la pérdida de suelo
- Reducción de la erosión hídrica
- Mejora de la calidad de los cultivos
- Mejora del estado ecológico de la cuenca

Inconvenientes

- Lentitud de instauración de las medidas
- Negativa de los propietarios
- Zona de actuación muy extensa

8. CONCLUSIONES

En primer lugar, se llega a la conclusión de que no solo hay una única alternativa que pueda solucionar el problema, sino que la elección de una alternativa u otra depende del valor ecológico que aporte a la zona, la mejora social o el coste de la actuación.



Además, una sola actuación es difícil que solucione el problema que se pretende solucionar, por lo que hay que seleccionar una serie de alternativas que trabajen en conjunto ya que sus efectos pueden ser sinérgicos.

CASO 1

Este caso está conformado por el conjunto de alternativas que darán mejor resultado, sin embargo requieren de la aprobación y participación de los propietarios de las parcelas que conforman la cuenca hidrográfica del arroyo.

Las alternativas son las siguientes:

- 1º Cambios en los usos y prácticas de conservación del olivar en la cuenca.
- 2º Creación de una llanura de inundación artificial.
- 3º Retirada del hormigón y redimensionamiento del cauce.

Cabe señalar que, en este caso, al ser un arroyo cuya agua proviene casi íntegramente de las lluvias, se reduce el caudal punta producido por un aguacero al disminuir enormemente la escorrentía. De ese modo, los calados y velocidades alcanzadas en el tramo serán mucho menores y no se requerirán elementos de protección de la erosión para el cauce como zonas hormigonadas, muros ni escolleras. Por otro lado, por el mismo motivo de reducción de velocidad y calado del agua, la actuación será más estable, no requerirá de un mantenimiento constante y se podrá asentar sobre los taludes una vegetación de ribera adecuada que mejore el estado ecológico y el entorno del tramo.

CASO 2

En el caso de que no sea posible el cambio de usos y prácticas de conservación del olivar debido a la negativa de los titulares de las parcelas, la solución al problema será más difícil, sin embargo se recurrirá a las siguientes alternativas, todas con actuaciones estructurales, con las que se pierde el potencial ecológico de la actuación:

- 1º Creación de una serie de diques de laminación.
- 2º Creación de una llanura de inundación artificial.
- 3º Retirada del hormigón y redimensionamiento del canal.
- 4º Creación de saltos a lo largo del tramo para reducir la pendiente.

Con este caso no se soluciona el origen del problema, sin embargo se lamina el caudal que llega a la zona de estudio para evitar los daños que se producen actualmente.

Eliminando el hormigón y redimensionando el cauce se produce una pequeña mejora ecológica, pequeña ya que las velocidades siguen siendo bastante altas y producen una gran erosión en determinadas zonas que serán protegidas como por ejemplo con cuencas de recepción de hormigón debajo de los saltos y con escollera en la parte exterior de las



curvas. El resto de las zonas se protegerán con elementos de bioingeniería en función de los cortantes que se alcancen en lecho y taludes.

Una vez seleccionada uno de los dos casos se deberá desarrollar un proyecto que indique exactamente como debe de realizarse exactamente cada alternativa.

ANEJOS DE LA MEMORIA

ANEJO N° 1

CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	7
2. CARTOGRAFÍA DIGITAL BASE	7
3. LOCALIZACIÓN DEL TRAMO	8
4. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA CUENCA	10
4.1. Delimitación y parámetros representativos	10
4.1.1. Divisoria	11
4.1.2. Parámetros de forma	12
4.1.3. Parámetros de relieve	14
4.2. Red de drenaje	25
4.3. Caracterización climática	27
4.3.1. Estación meteorológica	28
4.4. Geología y edafología	35
4.4.1. Contexto geológico	35
4.4.2. Contexto geológico local. Zona de actuación	36
4.4.3. Geomorfología	40
4.4.4. Morfología fluvial	40
4.5. Usos del suelo y vegetación	41
4.5.1. Usos del suelo	41
4.5.2. Vegetación	42
4.6. Fauna	46
4.7. Estado socioeconómico	47
5. CARACTERIZACIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO	50
5.1. Parcelario catastral	50



5.2.	<i>Medio natural</i>	55
5.2.1.	<i>Vegetación de ribera</i>	55
5.2.2.	<i>Fauna</i>	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1: Localización de la cuenca hidrográfica del Guadalquivir en la península ibérica.....	8
Fig. 2: Cuenca hidrográfica del Guadalquivir.....	8
Fig. 3: Localización del tramo de actuación dentro de la provincia de Córdoba.....	9
Fig. 4: Localización del canal.....	10
Fig. 5: Cuenca del Arroyo de las Canteras sobre mapa de curvas de nivel.....	11
Fig. 6: Cuenca del Arroyo de las Canteras sobre ortofoto	12
Fig. 7: Mapa de pendientes reclasificada en % según FAO	15
Fig. 8: Mapa de pendientes reclasificada en %	16
Fig. 9: Mapa de pendientes (grados) de la cuenca del arroyo de las Canteras.....	17
Fig. 10: Mapa altimétrico de la cuenca del arroyo de las Canteras.....	18
Fig. 11: Mapa del Modelo Digital del Terreno de la cuenca del arroyo de las Canteras.	20
Fig. 12: Mapa de elevaciones reclasificado en intervalos cada 10 metros de la cuenca del arroyo de las Canteras.	21
Fig. 13: Curva hipsométrica de la cuenca del arroyo de las Canteras	22
Fig. 14: Perfil longitudinal del arroyo de las Canteras	23
Fig. 15: Perfil longitudinal y cauce principal digitalizado del arroyo de las Canteras.....	24
Fig. 16: Representación de la pendiente media del arroyo de las Canteras.....	25
Fig. 17: Red de drenaje sobre MDT de la cuenca del arroyo de las Canteras.	26
Fig. 18: Red de drenaje principal de la cuenca del arroyo de las Canteras.....	27
Fig. 19: Información de la estación de Castro del Río	28
Fig. 20: Localización de la estación meteorológica y el tramo de estudio en Castro del Río.	29
Fig. 21: Determinación del género del clima mediterráneo	30
Fig. 22: Parámetros de un diagrama ombrotérmico o climodiagrama.	34
Fig. 23: Diagrama ombrotérmico o climodiagrama de Castro del Río, Córdoba.	34
Fig. 24: Encuadre geológico regional de las cordilleras Béticas.	36
Fig. 25: Mapa litológico nacional del arroyo de las Canteras.	37
Fig. 26: Mapa edafológico digital.....	38
Fig. 27: Suelo Vertisol Crómico.....	39
Fig. 28: Suelo Cambisol Cálcico.....	39
Fig. 29: Fotografía ejemplo de vegetación natural existente en la cuenca.....	41
Fig. 30: Mapa de usos del suelo de la cuenca del arroyo de las Canteras	42
Fig. 31: Mapa Forestal de España, Provincia de Córdoba 1:2.000.000.	43
Fig. 32: Mapa de pisos bioclimáticos de Andalucía Occidental	44
Fig. 33: Mapa de Series de vegetación de Andalucía.	45
Fig. 34: Mapa de vegetación potencial de España.	45
Fig. 35: Ejemplo de vegetación potencial en la cuenca del arroyo de las Canteras.	46
Fig. 36: Campanario de Castro del Río y paisaje.....	47
Fig. 37: Evolución de la población (1998-2008).	48
Fig. 38: Distribución de la población por grupos de edad.	48
Fig. 39: Evolución de la población activa.....	49
Fig. 40: Distribución de la población según el tipo de sector laboral.....	50
Fig. 41: Mapa catastral de la zona de actuación.....	51

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Clases de gradiente de la pendiente</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 2: Datos necesarios para obtención de la elevación media de la cuenca del arroyo de las Canteras.</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 3: Tabla de datos para creación de curva hipsométrica de la cuenca.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 4: Clasificación climática de Köppen para la zona de Castro del Río.</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 5: Clasificación de valores del Índice Modificado de Fournier,.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 6: Tabla de cálculo de la ETC mensual según el método deThornwaite</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 7: Principales pisos bioclimáticos de España</i>	<i>33</i>

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1: Índice de Gravelius</i>	<i>13</i>
<i>Ecuación 2: Coeficiente de forma</i>	<i>14</i>
<i>Ecuación 3: Elevación media de la cuenca.....</i>	<i>19</i>
<i>Ecuación 4: Pendiente media del cauce principal</i>	<i>25</i>
<i>Ecuación 5: Coeficiente pluviométrico</i>	<i>30</i>
<i>Ecuación 6: índice de erosión potencial de Fournier</i>	<i>31</i>
<i>Ecuación 7: Índice de mediterraneidad 1</i>	<i>31</i>
<i>Ecuación 8: Índice de mediterraneidad 2</i>	<i>31</i>
<i>Ecuación 9: Índice de mediterraneidad 3</i>	<i>31</i>
<i>Ecuación 10: Índice de termicidad.....</i>	<i>32</i>



1. INTRODUCCIÓN

Se plantea la necesidad de dimensionar y proyectar la retirada del canal existente en el arroyo de las Canteras, localizado en Castro del Río, Córdoba. La finalidad de dicha actuación es el redimensionamiento del cauce para evitar futuros desbordamientos dentro del núcleo urbano y dotar al tramo de más naturalidad según la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos.

El objetivo del presente anejo es proporcionar la información necesaria para la caracterización de las unidades geológicas que afloran a lo largo del trazado planteado, litologías, usos del suelo, cobertura vegetal, etc. para que sirvan de base a los estudios y cálculos necesarios.

Además, se describe la localización exacta del tramo de actuación, las características de la cuenca y los trabajos realizados para la toma de datos taquimétricos en campo, necesario para el posterior diseño de las actuaciones en el tramo del arroyo de las Canteras, así como la consulta a la cartografía del Instituto Geográfico Nacional (I.G.N.).

Para la elaboración de esta memoria se han realizado diversas visitas a campo y se han recopilado datos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos mediante cartografía y la utilización de distintos software de modelización.

2. CARTOGRAFÍA DIGITAL BASE

Para la realización de este proyecto, se ha partido de información de diferentes capas digitales. Todas ellas proyectadas en el sistema geodésico de referencia ETRS89 con proyección UTM Huso 30.

- Modelo Digital del Terreno 1:25.000.
- Capa vectorial de polígonos con información del mapa edafológico nacional a escala 1:50.000. Tipos de suelo (MAGNA50).
- Capa vectorial de líneas con la red hidrográfica y curvas de nivel de España. (BCN25) (Escala 1:25.000).
- Capa vectorial de polígonos SIOSE (usos del suelo)
- Mapa edafológico digital (1:1.000.000), editado en el año 2001 por el Sistema Español de Información de Suelos.
- Ortofotografía aérea digital (PNOA máxima actualidad, 2004, y vuelo Americano del 1956)

Para abarcar la totalidad de la cuenca, todas estas capas requieren dos hojas del MTN50, la hoja 0945 (Castro del Río) para la mitad norte de la cuenca, y la hoja 0967 (Baena) para la mitad sur.

3. LOCALIZACIÓN DEL TRAMO

El tramo objeto de restauración es el tramo final del arroyo de las Canteras, afluente del río Guadajoz por su margen izquierda. El arroyo nace en el Cerro del Viso y discurre únicamente por el término municipal de Castro del Río. Pertenecer a la cuenca hidrográfica del Guadalquivir.

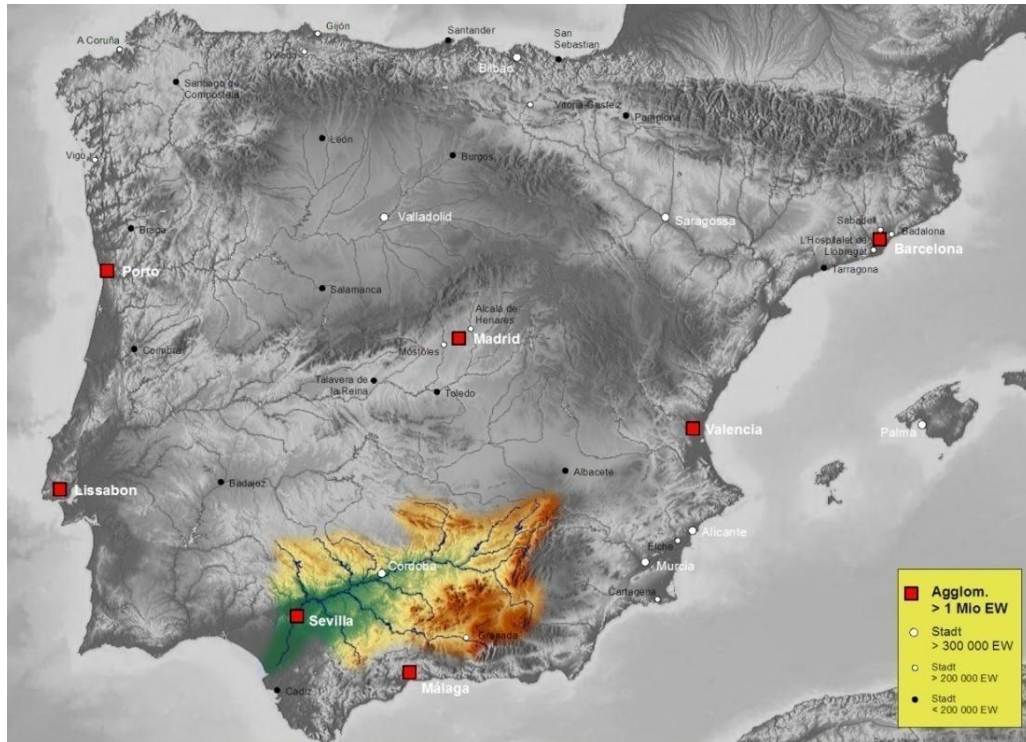


Fig. 1: Localización de la cuenca hidrográfica del Guadalquivir en la península ibérica. (Obtenido de: es.wikipedia.org)

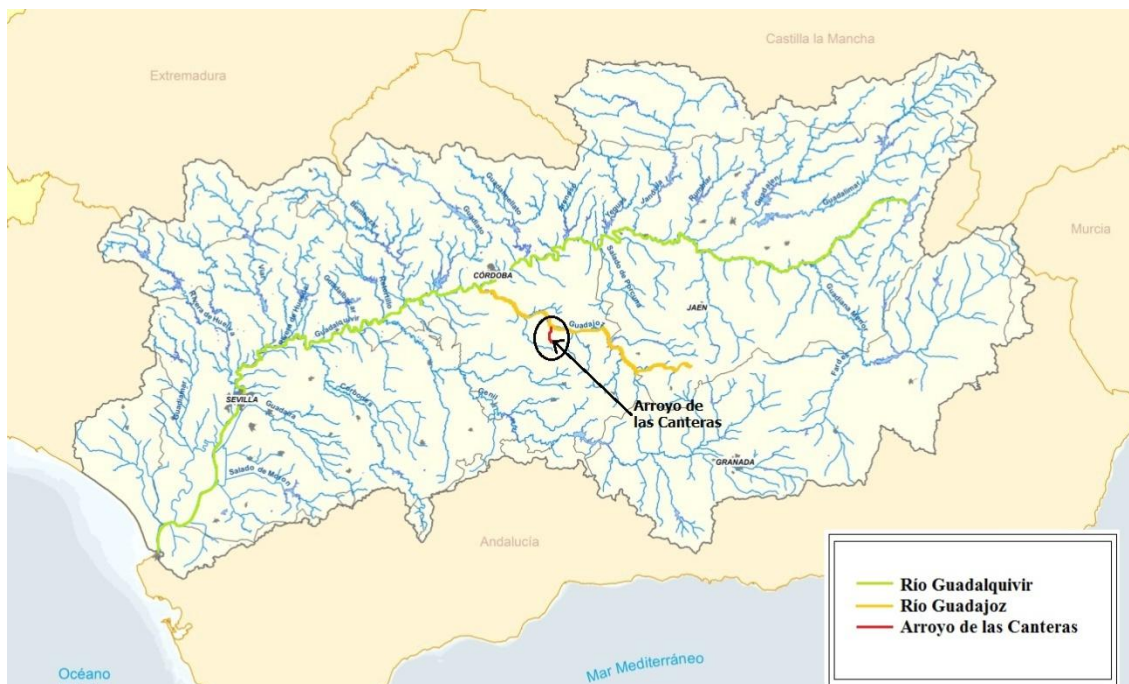


Fig. 2: Cuenca hidrográfica del Guadalquivir. (Obtenido de <http://www.chguadalquivir.es/>)

El tramo de actuación está localizado en las afueras de la localidad de Castro del Río (Córdoba). En la zona sur-este. Comienza en el final de las últimas parcelas con edificaciones cercanas al cauce hasta la confluencia con el río Guadajoz.

El tramo de actuación tiene una longitud aproximada de 520 metros, los cuales, 440 metros se encuentran canalizados.

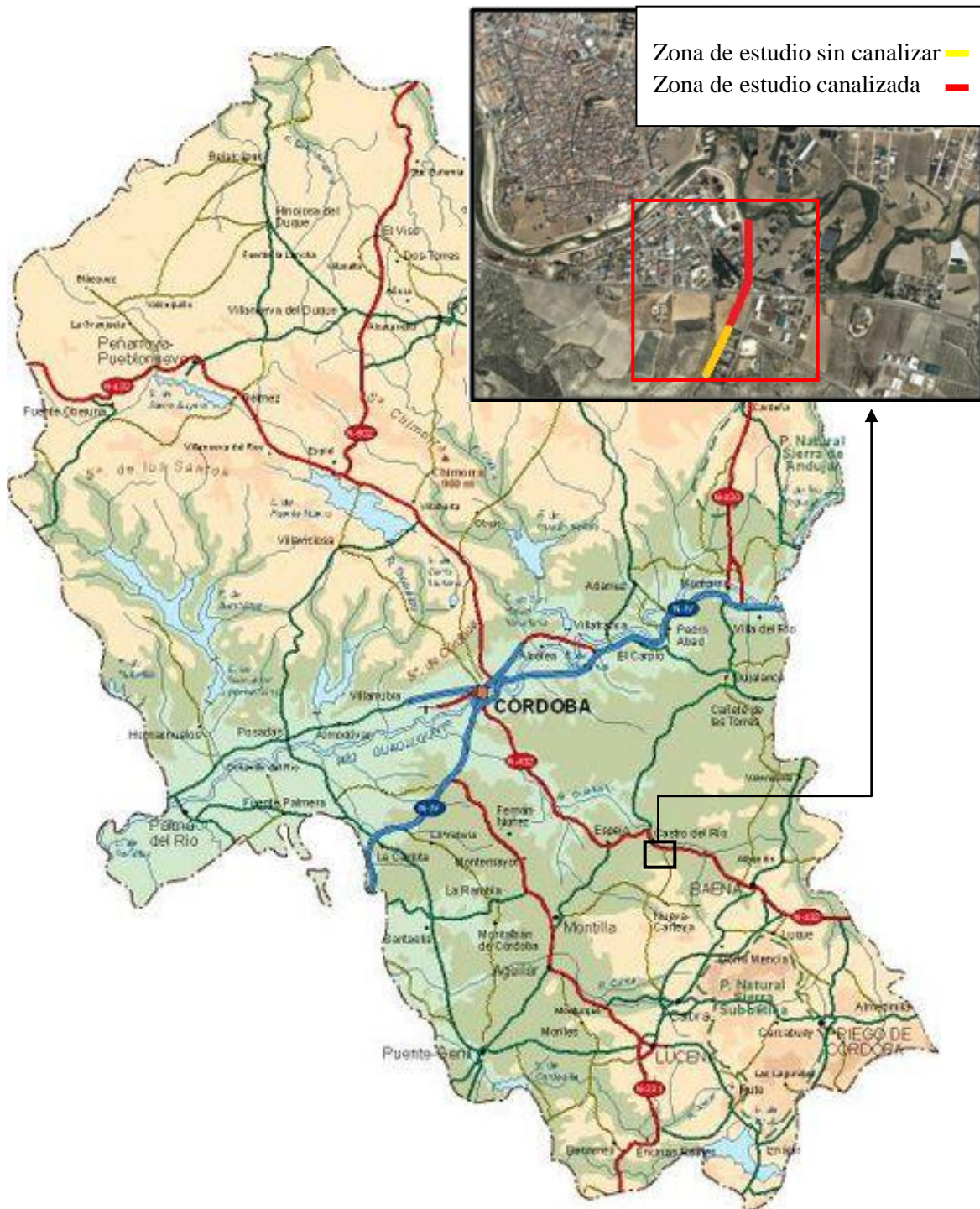


Fig. 3: Localización del tramo de actuación dentro de la provincia de Córdoba. (Obtenido de www.mapasvectoriales.com)



Fig. 4: Localización del canal. (Fuente: Iberpix)

Coordenada 1: European Datum ETRS89, UTM (30). X: 369892, Y: 4171687

Coordenada 2: European Datum ETRS89, UTM (30). X: 369950, Y: 4172110

4. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA CUENCA

Una cuenca hidrográfica es un territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, es decir, que vierte sus aguas a un punto concreto a través de un único río o arroyo. La cuenca hidrográfica está delimitada por la línea de las cumbres, también llamada divisoria de aguas.

4.1. DELIMITACIÓN Y PARÁMETROS REPRESENTATIVOS

En este apartado se ha delimitado sobre plano la cuenca del arroyo de las Canteras, tomando como punto de cierre, el comienzo del tramo canalizado.

Se han analizado además, distintos parámetros de forma y relieve de la cuenca.

4.1.1. DIVISORIA

La divisoria de aguas o *divortium aquarum* es una línea imaginaria que delimita la cuenca hidrográfica. Una divisoria de aguas marca el límite entre una cuenca hidrográfica y las cuencas vecinas. El agua precipitada a cada lado de la divisoria pertenece a ríos distintos.

Para poder delimitar la cuenca hidrográfica mediante la divisoria, es necesario conocer la topografía de la zona.

La topografía del terreno se obtiene a partir de las curvas del nivel de la capa BCN25 del Centro Nacional de Información Geográfica. Dichas curvas de nivel tienen una separación de 10 metros. Con ellas se ha delimitado la cuenca del arroyo de las Canteras.

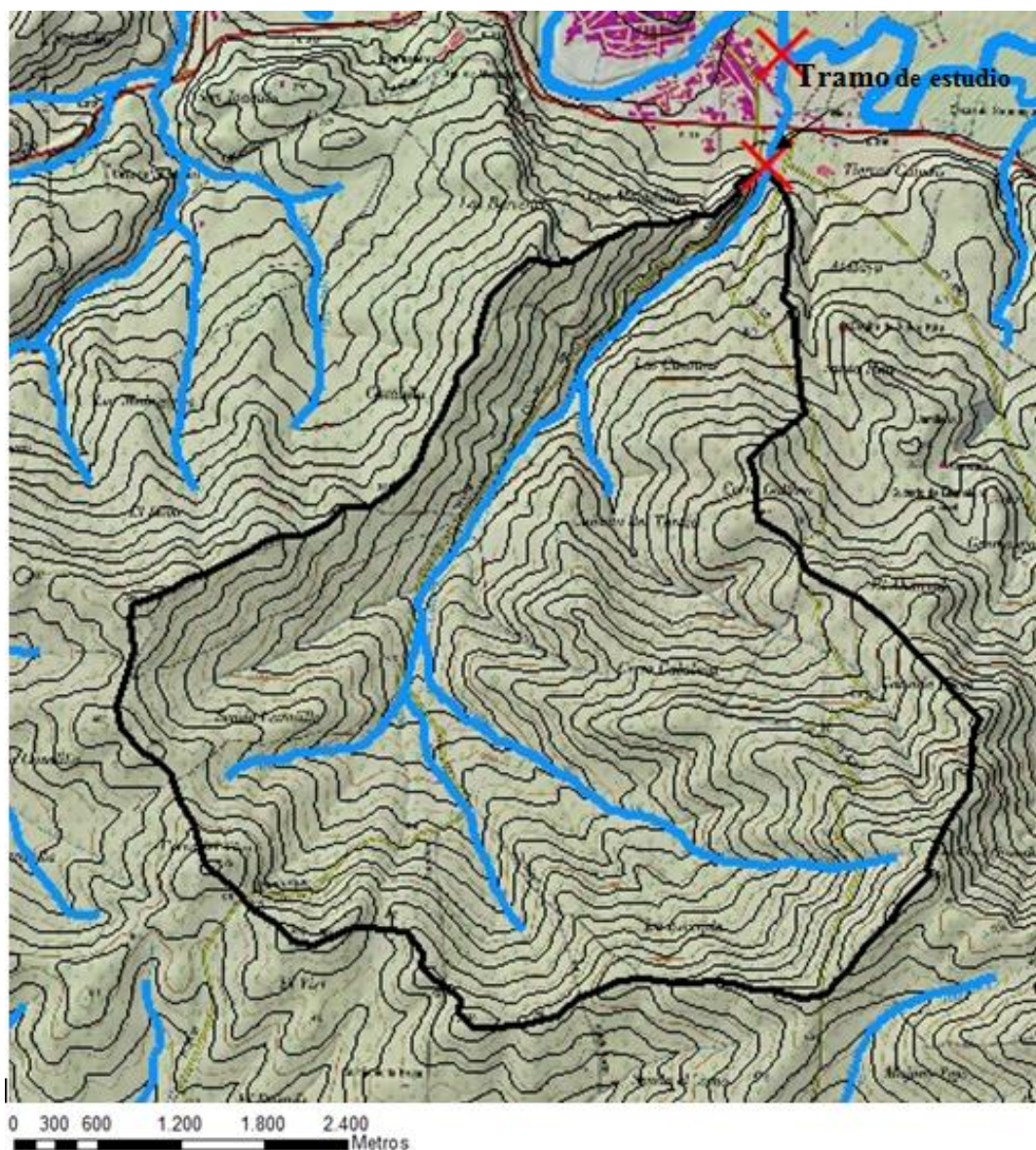


Fig. 5: Cuenca del Arroyo de las Canteras sobre mapa de curvas de nivel. (Elaboración propia)

La imagen de la cuenca sobre la ortofoto es la siguiente:

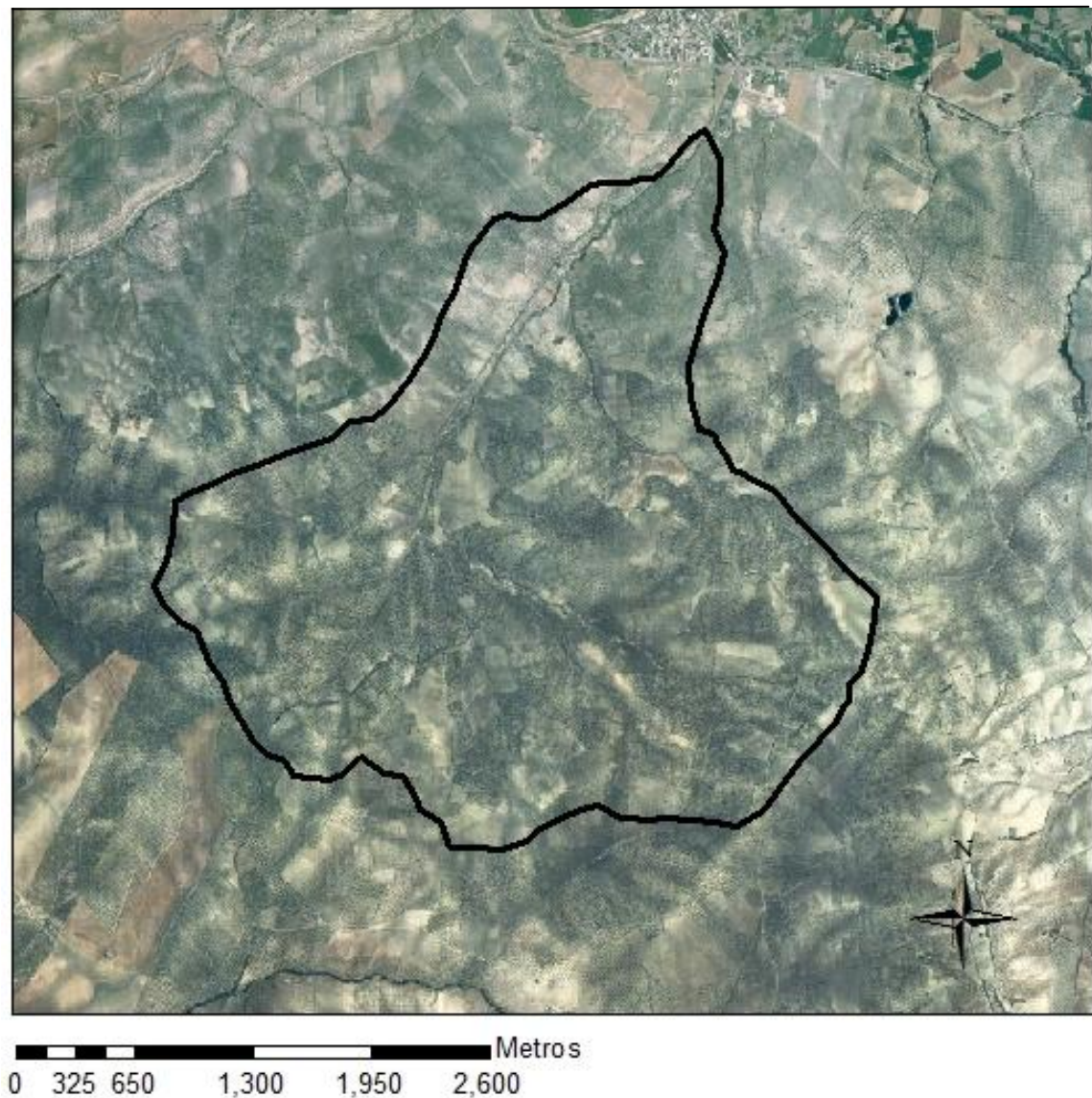


Fig. 6: Cuenca del Arroyo de las Canteras sobre ortofoto. (Elaboración propia)

4.1.2. PARÁMETROS DE FORMA

El valor de la magnitud del caudal depende en gran medida de la magnitud de la precipitación, sin embargo, la forma de la cuenca juega un papel predominante en la respuesta de ésta a dicha precipitación.

En términos básicos, la forma de la Cuenca Hidrográfica es muy importante con respecto a la respuesta hidrológica frente a una precipitación, pues se relaciona con el Tiempo de Concentración (T_c), el cual es el tiempo necesario que necesita el agua precipitada desde el inicio de la precipitación hasta llegar al punto de salida de la misma desde los límites más extremos de la cuenca.



Los parámetros de forma permiten realizar estudios cuantitativos sobre particularidades de la cuenca, evitándose las descripciones subjetivas, y se introducen parámetros matemáticos que se pueden calcular, permitiendo analizar el medio físico y su respuesta hidrológica mediante términos matemáticos.

A su vez, permite establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial en una cuenca, teniendo en cuenta que aquellas cuencas con formas alargadas, tienden a presentar un flujo de agua más veloz en comparación con las cuencas redondeadas, logrando una evacuación más rápida y un mayor desarrollo de energía cinética en el arrastre de sedimentos hacia el nivel de base.

Los parámetros a analizar serán la superficie, el perímetro, el índice de Gravelius y el Coeficiente de forma.

SUPERFICIE

Tanto la superficie como el perímetro de la cuenca se obtienen mediante ArcGIS, en las características del polígono georreferenciado que conforma la cuenca hidrográfica.

Área: $8.844.650,89 \text{ m}^2 = 8,84 \text{ km}^2$

PERÍMETRO

Perímetro: $13.187,8 \text{ m} = 13,19 \text{ km}$

ÍNDICE DE GRAVELIUS (K_c)

También llamado coeficiente de compacidad (K_c). Es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de área igual a la de la cuenca:

Su fórmula es:

Ecuación 1
$$K_c = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

*P: Perímetro de la cuenca (Km)

*A: Área de la cuenca (Km^2)

Resulta un K_c de 1,2416

Cuanto más se acerque el valor a 1, más redondeada será la cuenca, si se acerca más a 2, la cuenca tendrá una forma alargada.



COEFICIENTE DE FORMA (K_F)

Es la relación entre el ancho medio de la cuenca (B) y la longitud de su cauce principal (L_c). El ancho medio se obtiene cuando se divide el área de la cuenca por la longitud del cauce principal, por lo tanto el Coeficiente de Forma queda definido así:

La longitud cauce principal es de: 5,63 km

Ecuación 2

$$K_f = \frac{B}{L_c} = \frac{A}{L_c^2}$$

Sustituyendo en la fórmula resulta un valor de K_f de 0,30.

En la medida que el Coeficiente de Forma de una cuenca determinada sea más bajo, estará menos sujeta a avenidas que otra del mismo tamaño (área) pero con mayor Coeficiente de Forma. (Caso inverso al presentado para el Coeficiente de Compacidad o Índice de Gravelius).

4.1.3. PARÁMETROS DE RELIEVE

La influencia del relieve sobre la respuesta hidrológica de la cuenca es importante, puesto que a mayores pendientes corresponden mayores velocidades del agua en las corrientes y menor será el tiempo de concentración de la cuenca.

La influencia del relieve sobre el hidrograma es aún más evidente. A una mayor pendiente corresponderá una menor duración de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes al curso principal.

En este anejo se han analizado la pendiente de la cuenca, la curva hipsométrica, la elevación media de la cuenca, la pendiente del cauce principal y la pendiente del tramo de estudio.

PENDIENTE DE LA CUENCA

La pendiente de la cuenca es uno de los principales parámetros que caracteriza el relieve de la misma., sin embargo, la pendiente media implica representar toda la cuenca con un sólo valor de pendiente, una situación que, en cuencas muy heterogéneas no se ajusta a la realidad.

Por esta razón, en la actualidad se trabaja en el modelo de elevación digital del terreno de la cuenca, pieza clave en la delimitación de las unidades de paisaje presentes en una cuenca. Para el cálculo de la pendiente media en base al modelo digital del terreno, es necesario realizar una reclasificación de la pendiente en diferentes rangos de acuerdo a las características de la cuenca, algunos de estos rangos son:



Tabla 1: Clases de gradiente de la pendiente (Guía para la descripción de suelos. FAO, 2009)

%	Clasificación del terreno
0 - 0.2	Plano
0.2 - 0.5	Nivel
0.5 - 1.0	Cercano al nivel
1.0 - 2.0	Muy ligeramente inclinado
2 - 5	Ligeramente inclinado
5 - 10	Inclinado
10 - 15	Fuertemente inclinado
15 - 30	Moderadamente escarpado
30 - 60	Escarpado
> 60	Muy escarpado

El análisis de las pendientes de la cuenca con la clasificación anterior de la FAO, se representa en el siguiente mapa:

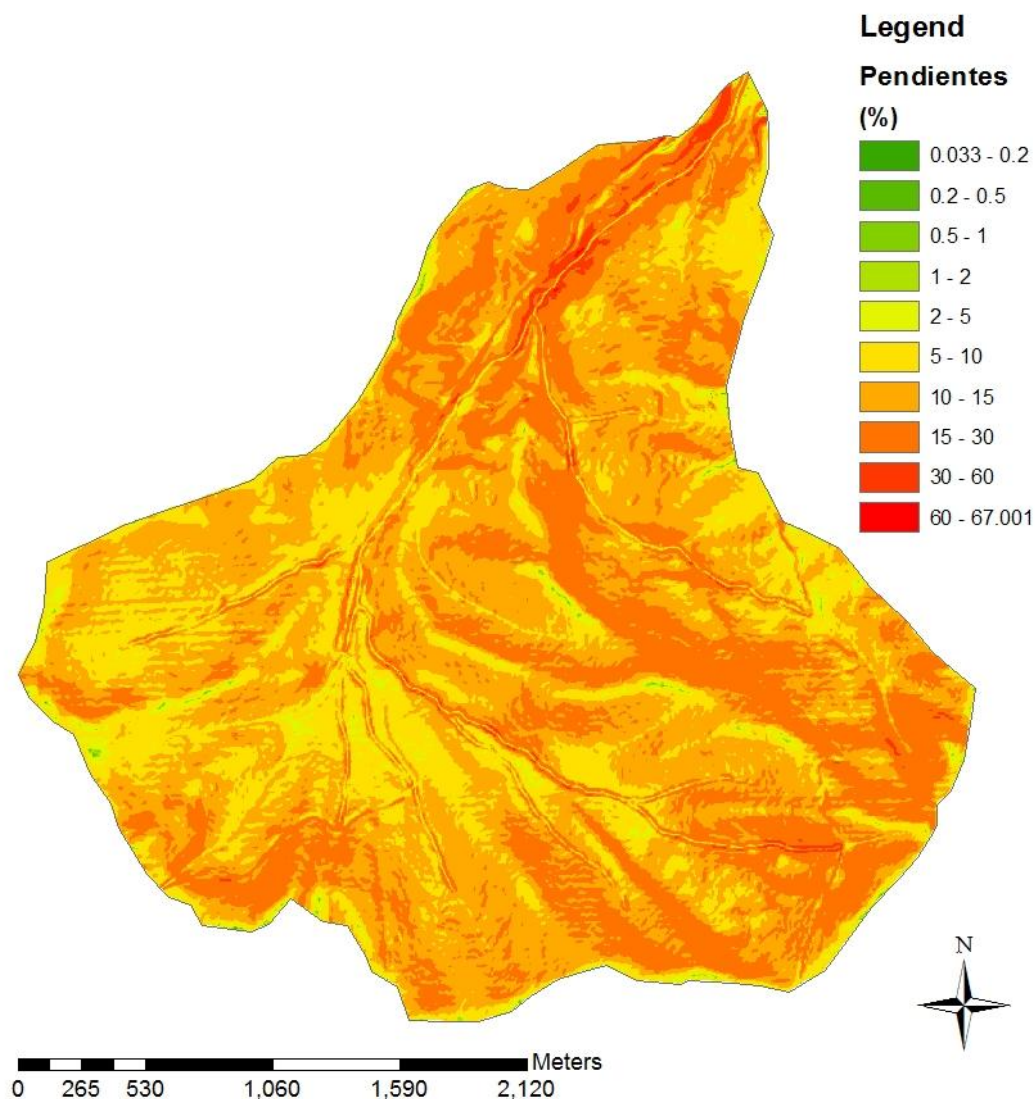


Fig. 7: Mapa de pendientes reclasificada en % según FAO (Elaboración propia)

Analizando las pendientes según otra clasificación de intervalos de pendientes, el mapa resultante es:

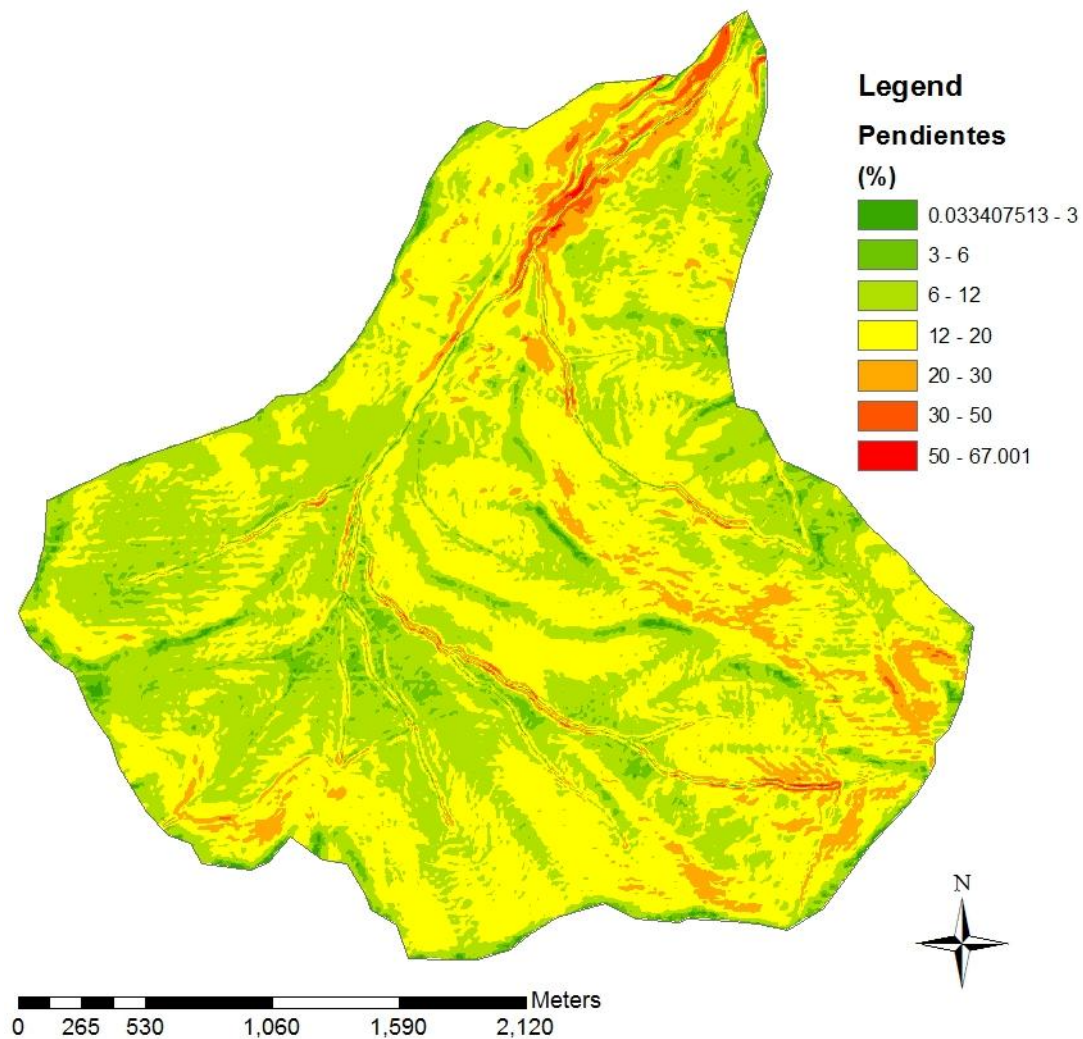


Fig. 8: Mapa de pendientes reclasificada en % (Elaboración propia)

En cualquier caso, la pendiente media de la cuenca del arroyo de las Canteras en porcentaje es:

Pendiente media de la cuenca del arroyo de las Canteras: 13.22 %

Si se quieren analizar las pendientes representadas en grados, el mapa resultante mediante ArcGIS es el que viene a continuación. Con una pendiente media de la cuenca, obtenida a partir de la pestaña “source” de las propiedades de la capa, con un valor de 7.51 grados.

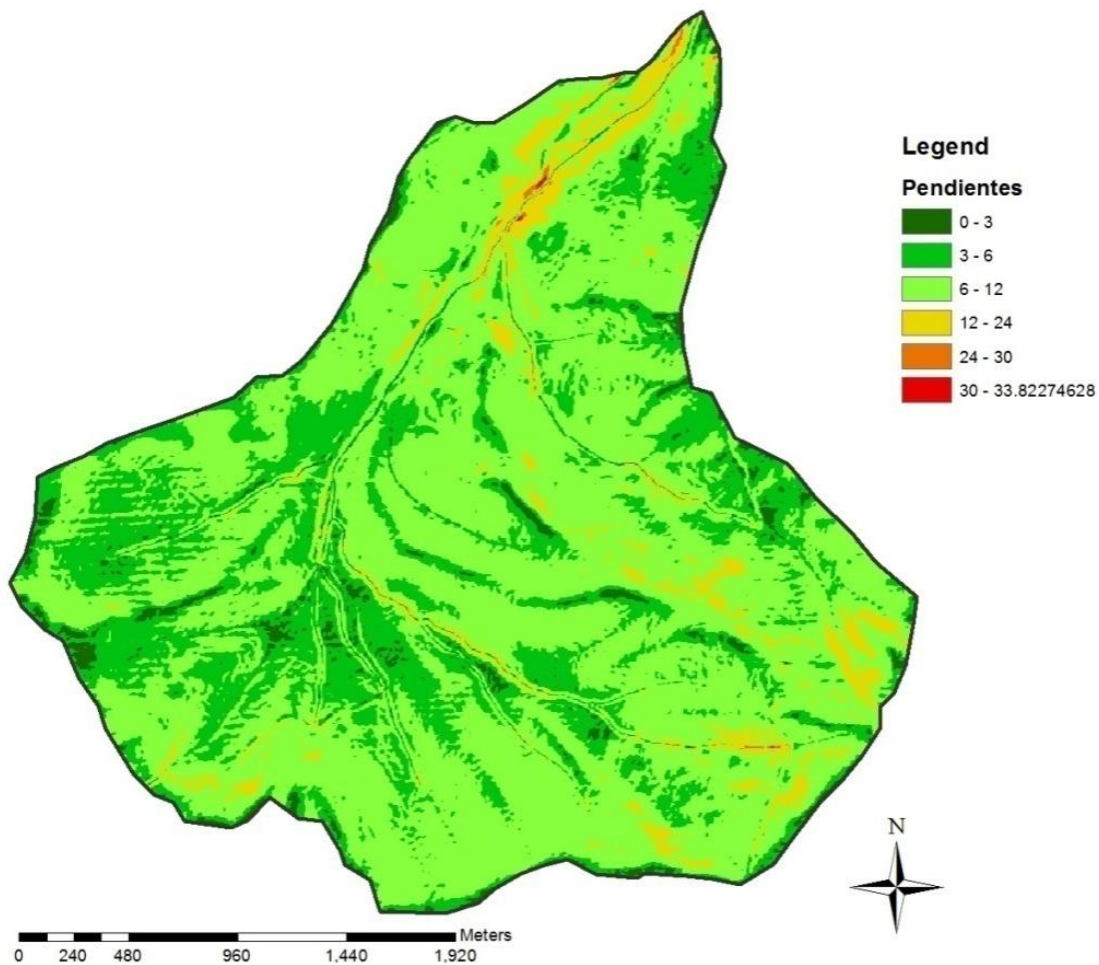


Fig. 9: Mapa de pendientes (grados) de la cuenca del arroyo de las Canteras. (Elaboración propia)

En conclusión, la pendiente media de la cuenca es un factor importante ya que es uno de los que mayor influencia tiene en la duración de la escorrentía, la magnitud de las descargas, la infiltración, la humedad del suelo y la probable aparición de aguas subterráneas.

ALTITUDES

La elevación media de la cuenca, así como la diferencia entre sus elevaciones extremas, influye en la meteorología, ya que determina principalmente las formas de la precipitación. Por lo general, existe una buena correlación, entre la precipitación y la elevación de la cuenca, es decir, a mayor elevación mayor precipitación. Por otro lado, las variaciones de altitud en el interior de la cuenca, así como su altitud media, son esenciales también para el estudio de la temperatura, que tienen un efecto importante sobre las pérdidas de agua por evaporación como consecuencia de la altitud.

El arroyo de las Canteras discurre desde los 504 m de altitud sobre el nivel del mar hasta los 210 m en su desembocadura en el río Guadajoz.

Las alturas se distribuyen en la cuenca de la siguiente manera:

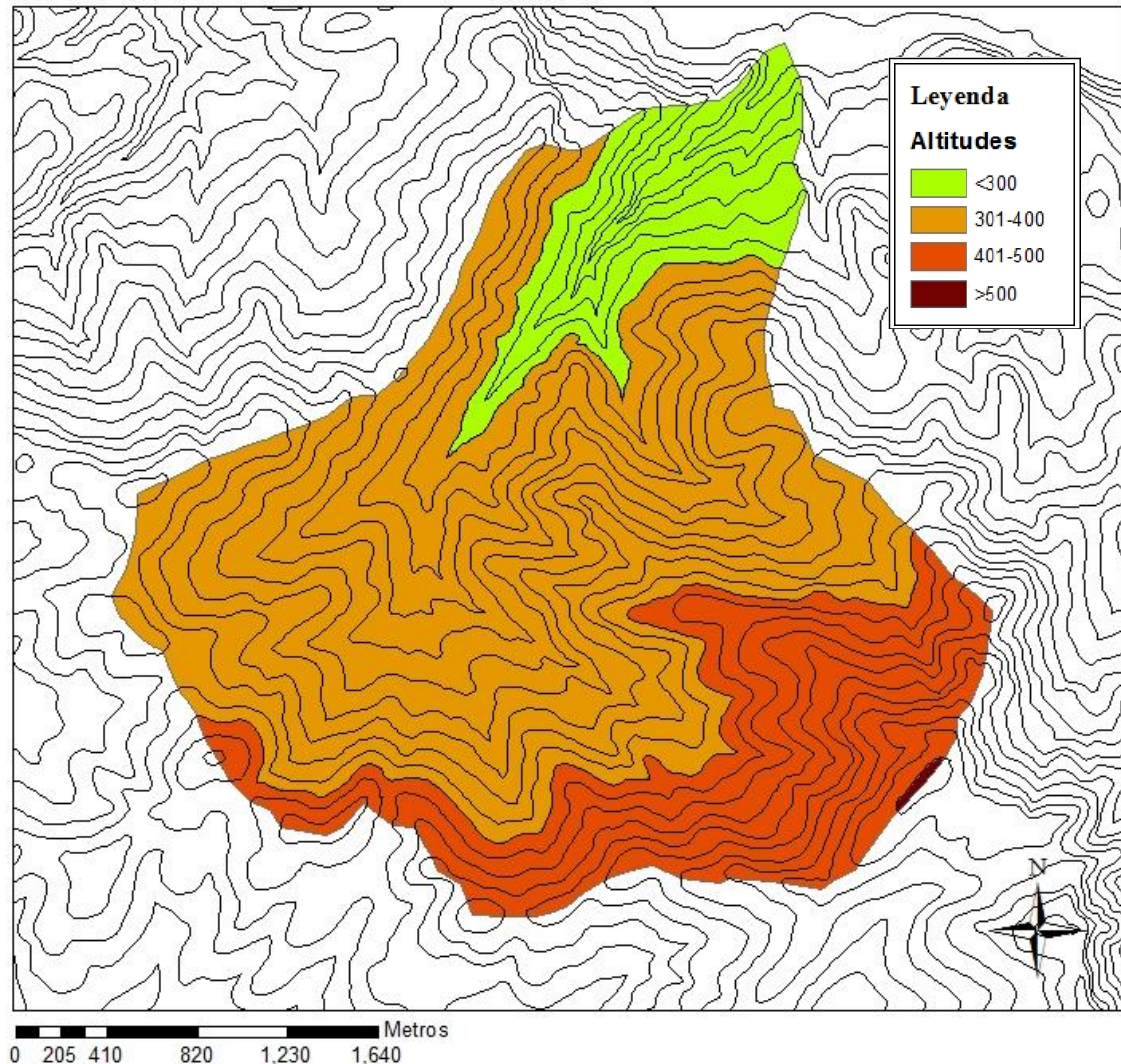


Fig. 10: Mapa altimétrico de la cuenca del arroyo de las Canteras. (Elaboración propia)

Analizando las propiedades de la capa de altitudes de la cuenca mediante ArcGIS, se ve que la cuenca tiene una altitud media de:

Elevación media: 366,38 m

Para obtener la elevación media mediante un método manual matemático, se aplica un método basado en la siguiente fórmula:



Ecuación 3

$$H = \frac{\sum(c_i * a_i)}{A}$$

Donde:

**H: elevación media (m)*

**c_i = cota promedio: cota media del área i delimitada entre dos curvas de nivel (m)*

**a_i: área i entre dos curvas de nivel (m²)*

Estos datos se encuentran en la *tabla 2* (explicados en el apartado siguiente de curva hipsométrica)

Tabla 2: Datos necesarios para obtención de la elevación media de la cuenca del arroyo de las Canteras. (Elaboración propia)

Nº	cotas		Área entre curvas
	min	max	
1	223.511	230	226.7555
2	230	240	235
3	240	250	245
4	250	260	255
5	260	270	265
6	270	280	275
7	280	290	285
8	290	300	295
9	300	310	305
10	310	320	315
11	320	330	325
12	330	340	335
13	340	350	345
14	350	360	355
15	360	370	365
16	370	380	375
17	380	390	385
18	390	400	395
19	400	410	405
20	410	420	415
21	420	430	425
22	430	440	435
23	440	450	445
24	450	460	455
25	460	470	465
26	470	480	475
27	480	490	485
28	490	500	495
29	500	509.17	504.585

Sustituyendo los datos de la tabla en la fórmula de “H”, elevación media de la cuenca, citada anteriormente, se verifica la elevación media de la cuenca.

Elevación media de la cuenca: 366,38 metros.

CURVA HIPSOMÉTRICA

La curva hipsométrica es la representación más precisa de la elevación de una cuenca. Ésta es el producto del área asociada a cada intervalo de elevación, es decir, una representación bidimensional, que grafica en el eje vertical la elevación y en el eje horizontal el porcentaje del área sobre cada curva de nivel, en términos del área total.

Es decir, es una representación gráfica de la superficie del terreno que se encuentra por encima de determinada cota.

Para calcular la curva hipsométrica, en primer lugar se requiere el Modelo Digital del Terreno de la cuenca.

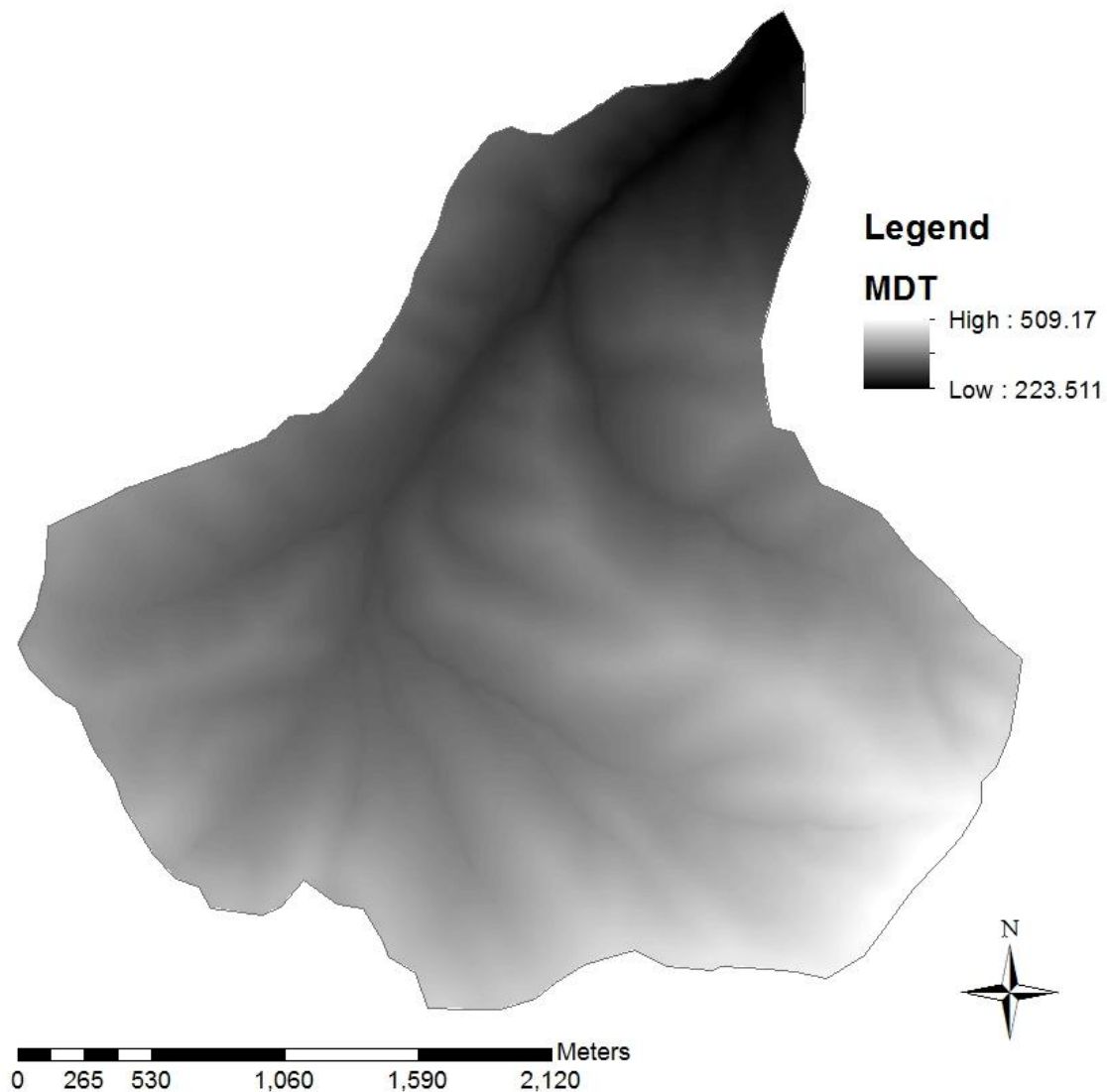


Fig. 11: Mapa del Modelo Digital del Terreno de la cuenca del a. de las Canteras. (Elaboración propia)

Una vez obtenido el MDT, este se reclasifica en intervalos de altitudes, clasificándolos de 10 en 10 metros, siendo de 0 a 1, desde la cota inferior a la siguiente cota múltiplo de 10, de 1 a 2 de la primera cota múltiplo de 10 a una cota 10 metros superior, y así consecutivamente hasta llegar a la cota superior de la cuenca.

Esta reclasificación da como resultado el siguiente mapa:

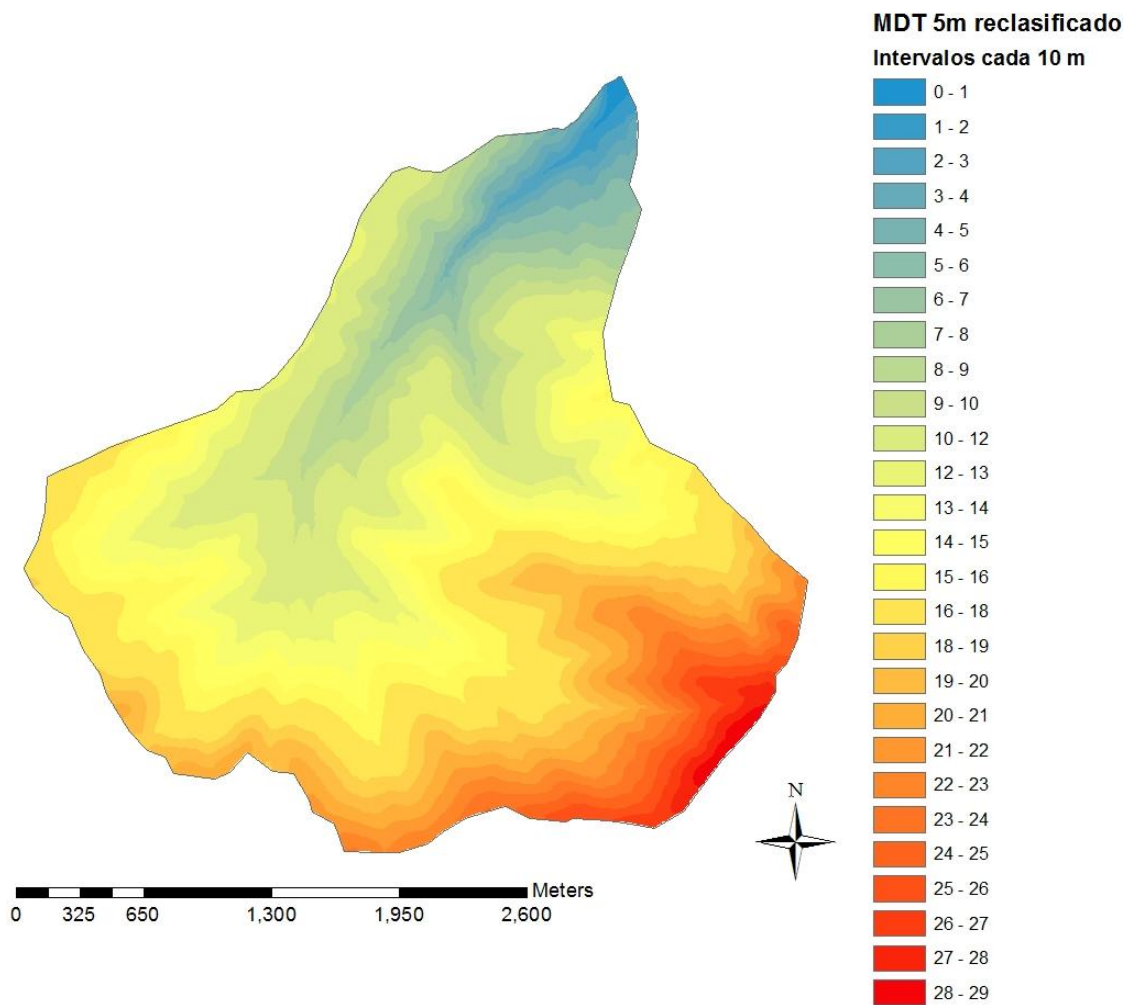


Fig. 12: Mapa de elevaciones reclasificado en intervalos cada 10 metros de la cuenca del arroyo de las Canteras.
(Elaboración propia)

Una vez obtenidos los intervalos reclasificados de las elevaciones de la cuenca, abriendo la tabla de atributos en ArcGIS, se obtiene el número de píxeles asociado a cada intervalo.

Exportando la tabla a Excel y multiplicando el número de píxeles por el área de cada píxel, en este caso 5x5 metros, es decir, 25 m², se obtendrá el área de la cuenca que corresponde a cada intervalo.



Una vez obtenidos estos datos, se calcula el promedio de cada intervalo de cotas y el porcentaje de superficie que corresponde a dichos intervalos, tanto porcentajes parciales como porcentajes acumulados.

Todos estos datos están reflejados en la *tabla 3*.

Tabla 3: Tabla de datos para creación de curva hipsométrica de la cuenca. (Elaboración propia)

N°	cotas		promedio	Área entre curvas	Área acumulada	% Acumulado	% parcial
	min	max					
1	223.511	230	226.7555	15700	15700	100.00	0.18
2	230	240	235	40250	55950	99.82	0.46
3	240	250	245	63125	119075	99.37	0.71
4	250	260	255	92675	211750	98.65	1.05
5	260	270	265	121800	333550	97.61	1.38
6	270	280	275	151975	485525	96.23	1.72
7	280	290	285	191425	676950	94.51	2.16
8	290	300	295	246000	922950	92.35	2.78
9	300	310	305	323775	1246725	89.56	3.66
10	310	320	315	406925	1653650	85.90	4.60
11	320	330	325	509775	2163425	81.30	5.76
12	330	340	335	590150	2753575	75.54	6.67
13	340	350	345	640950	3394525	68.87	7.25
14	350	360	355	698500	4093025	61.62	7.90
15	360	370	365	734200	4827225	53.72	8.30
16	370	380	375	662725	5489950	45.42	7.49
17	380	390	385	575975	6065925	37.93	6.51
18	390	400	395	479950	6545875	31.42	5.43
19	400	410	405	423325	6969200	25.99	4.79
20	410	420	415	430075	7399275	21.20	4.86
21	420	430	425	329400	7728675	16.34	3.72
22	430	440	435	274225	8002900	12.62	3.10
23	440	450	445	242925	8245825	9.51	2.75
24	450	460	455	168025	8413850	6.77	1.90
25	460	470	465	137275	8551125	4.87	1.55
26	470	480	475	116775	8667900	3.32	1.32
27	480	490	485	85450	8753350	2.00	0.97
28	490	500	495	57850	8811200	1.03	0.65
29	500	509.17	504.585	33225	8844425	0.38	0.38

Utilizando las cotas y el porcentaje de área acumulada, se crea la curva hipsométrica de la cuenca del arroyo de las Canteras.

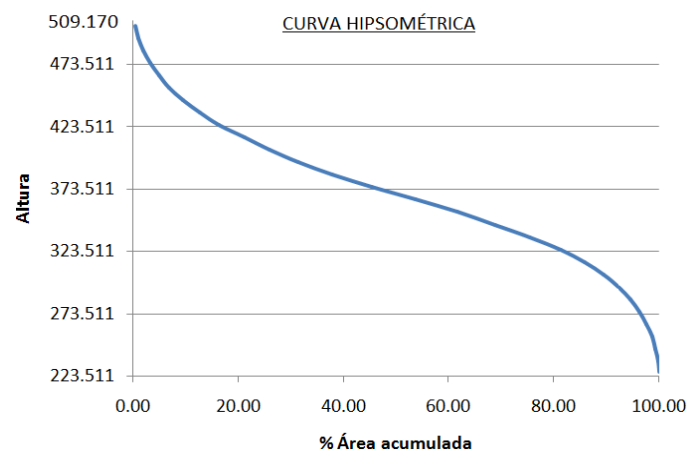


Fig. 13: Curva hipsométrica de la cuenca del arroyo de las Canteras (Elaboración propia)

PERFIL LONGITUDINAL:

El perfil longitudinal de un río o arroyo indica, de forma gráfica, cual es la topografía del terreno por el que discurre el cauce principal, de esa forma se puede apreciar de forma clara la pendiente del cauce.

Se puede obtener el perfil longitudinal mediante varias herramientas, en este caso se ha utilizado el Modelo Digital del Terreno de Andalucía, y ArcGIS.

Con el primer método, se digitaliza el cauce sobre el mapa base y automáticamente va apareciendo el perfil asociado a la polilínea creada:

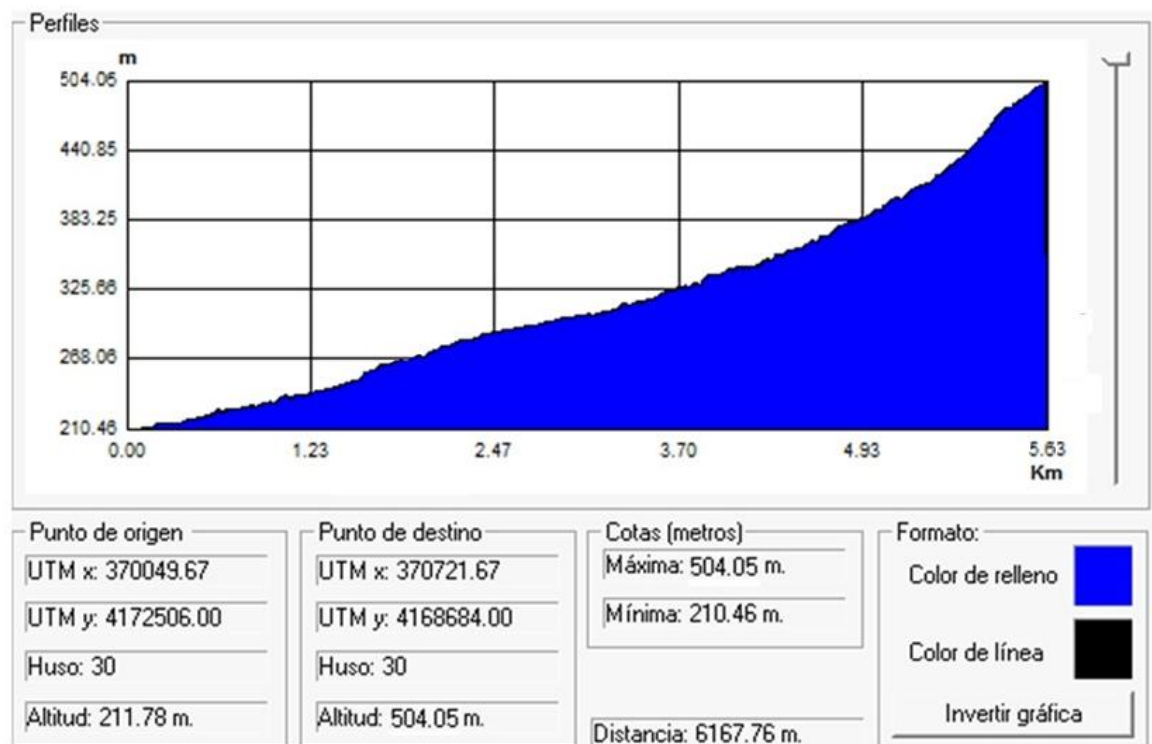


Fig. 14: Perfil longitudinal del arroyo de las Canteras. (Elaboración propia mediante el Modelo Digital del Terreno de Andalucía)

Para comprobar la exactitud de este método, se procede a la obtención del perfil mediante ArcGIS.

En este caso se necesita cargar en el programa la capa del Modelo Digital del Terreno (MDT), se crea una nueva capa tipo “shape” en la cual se digitalizará el cauce principal, se combinará con el MDT y mediante la herramienta “3D analyst” se obtiene el perfil pulsando el icono “Profile graph”.

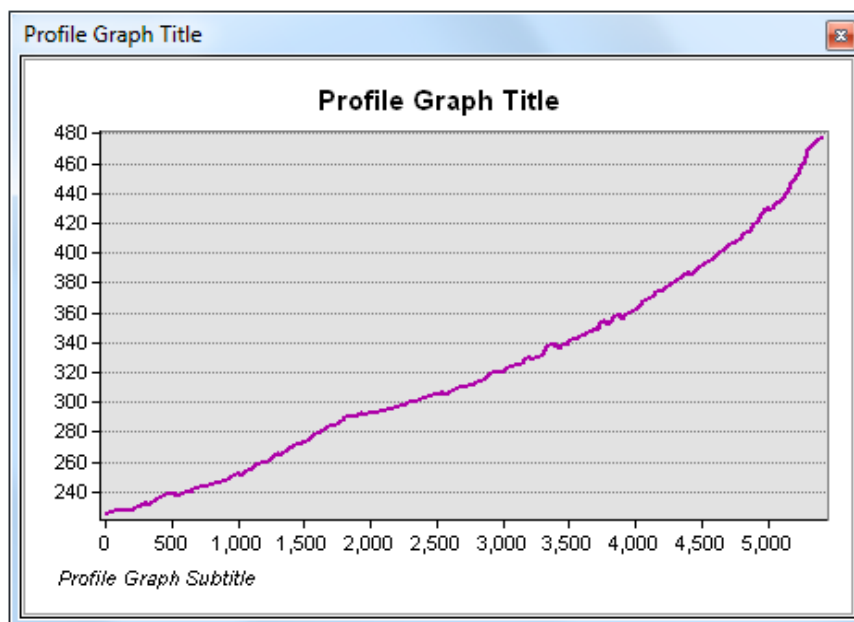
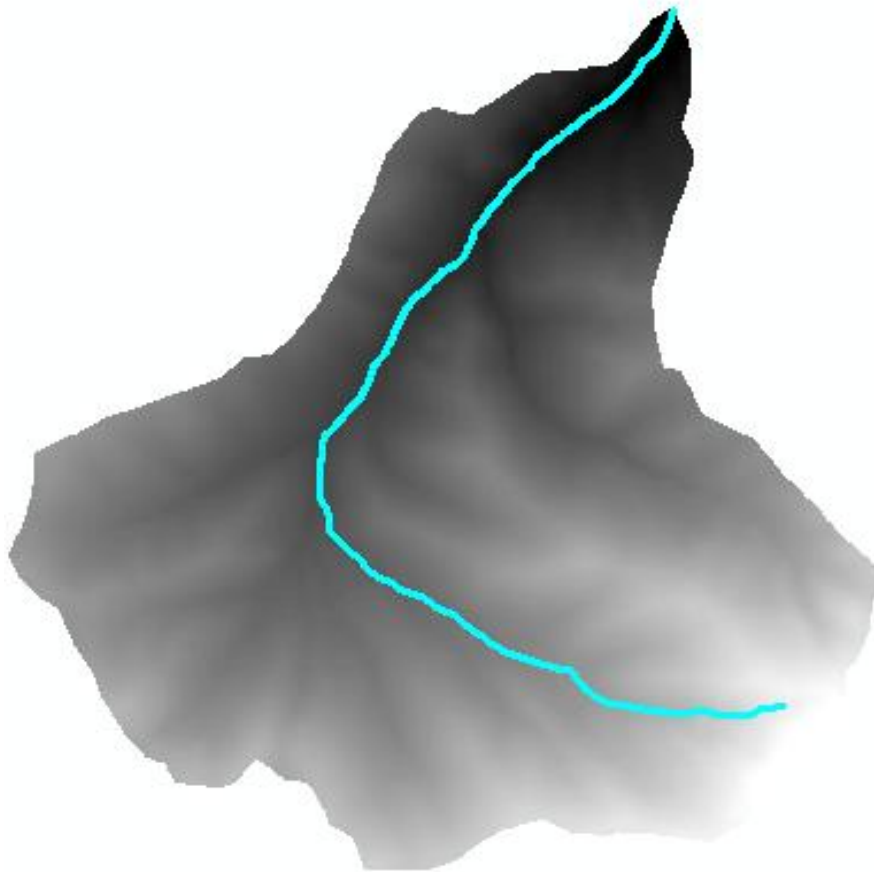


Fig. 15: Perfil longitudinal y cauce principal digitalizado del arroyo de las Canteras. (Elaboración propia)

Ya que ambos perfiles son idénticos, se verifica que ambos métodos son válidos para la obtención del perfil longitudinal.

PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE PRINCIPAL

La pendiente media del cauce es la diferencia total de elevación del cauce principal (cota máxima – cota mínima), dividida por su longitud total (L_c):

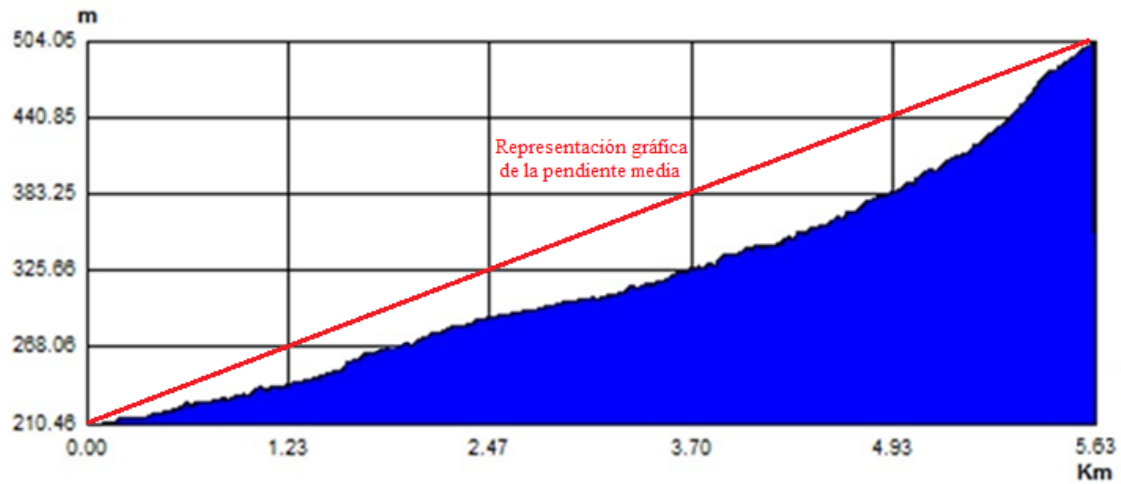


Fig. 16: Representación de la pendiente media del arroyo de las Canteras (Elaboración propia)

La fórmula es la siguiente:

Ecuación 4

$$Sm = \frac{H_{máx} - H_{mín}}{L_c}$$

Sustituyendo los datos ya conocidos:

$$\begin{aligned} *H_{máx} &= \text{Cota máxima: } 504,06 \text{ m} \\ *H_{mín} &= \text{Cota mínima: } 210,46 \text{ m} \\ *L_c &= \text{Longitud del cauce: } 5,63 \text{ km} = 5630 \text{ m} \end{aligned}$$

Resulta una pendiente media del cauce principal del arroyo de las Canteras de 0.052 m/m

Pendiente media del cauce principal: 0.052 m/m

4.2. RED DE DRENAJE

La red de drenaje se refiere a la red natural de transporte gravitacional de agua y sedimentos de una cuenca. La mayor parte de esta agua no cae directamente en los cauces fluviales y los lagos, sino que se infiltra en el suelo y desde éste se filtra al canal fluvial, esorrentía, constituyendo arroyos.

Los patrones o geometrías de las redes de drenaje son el resultado no sólo de la dinámica fluvial sino también de la deformación tectónica de la superficie terrestre.

Para obtener la red de drenaje de la cuenca del arroyo de las Canteras, se utilizará ArcGIS.

Mediante el Modelo Digital del Terreno se creará una capa de dirección de flujo mediante la herramienta “flow direction”, y a partir de esta, la capa en la que se representa la red de drenaje, es decir, la de acumulación de flujo, mediante la herramienta “flow accumulation”.

El mapa obtenidos es el siguiente:

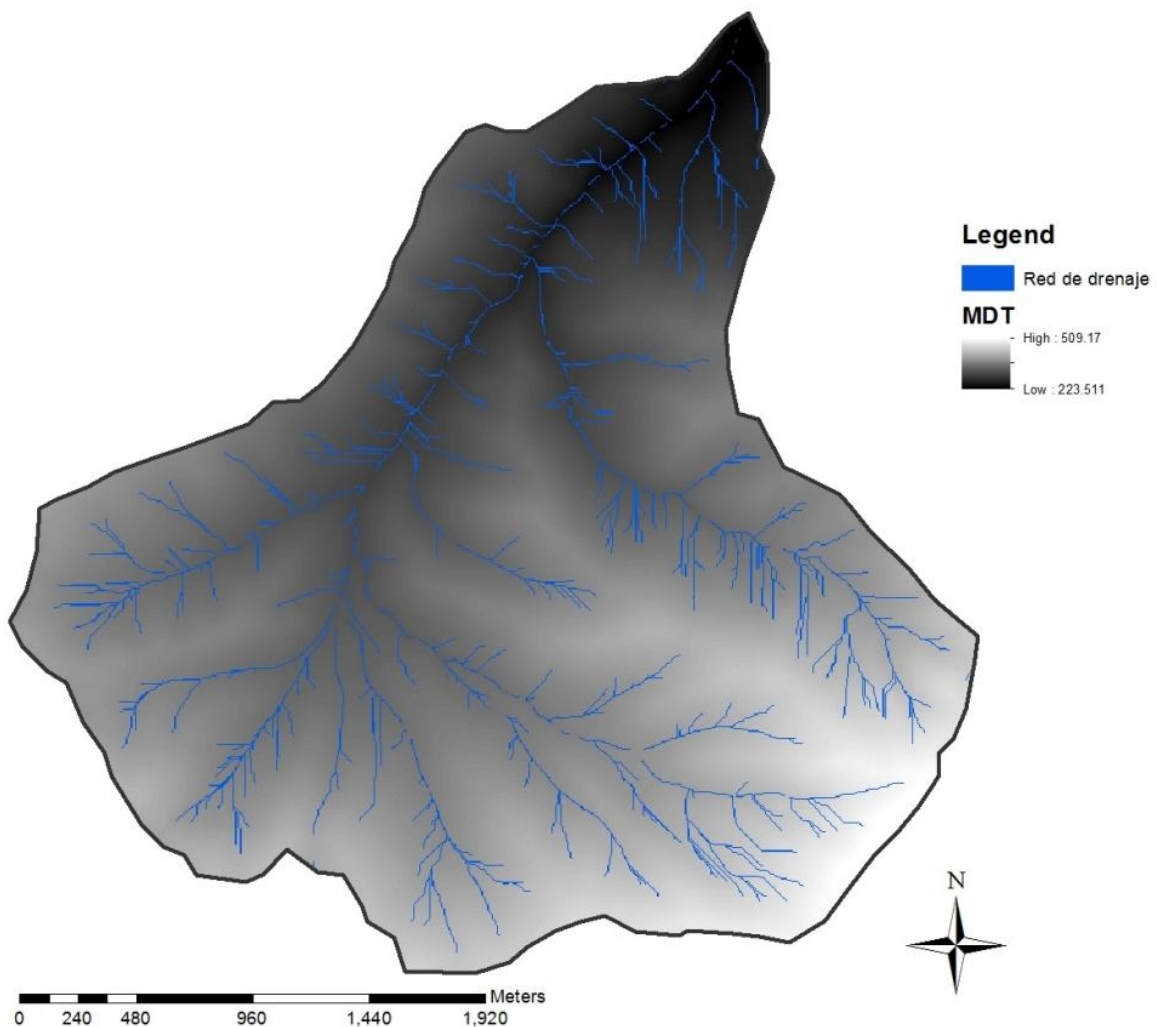


Fig. 17: Red de drenaje sobre MDT de la cuenca del arroyo de las Canteras. (Elaboración propia)

Con el anterior mapa detallado de la red de drenaje, se ha simplificado para obtener la red de drenaje principal resultado el siguiente mapa:

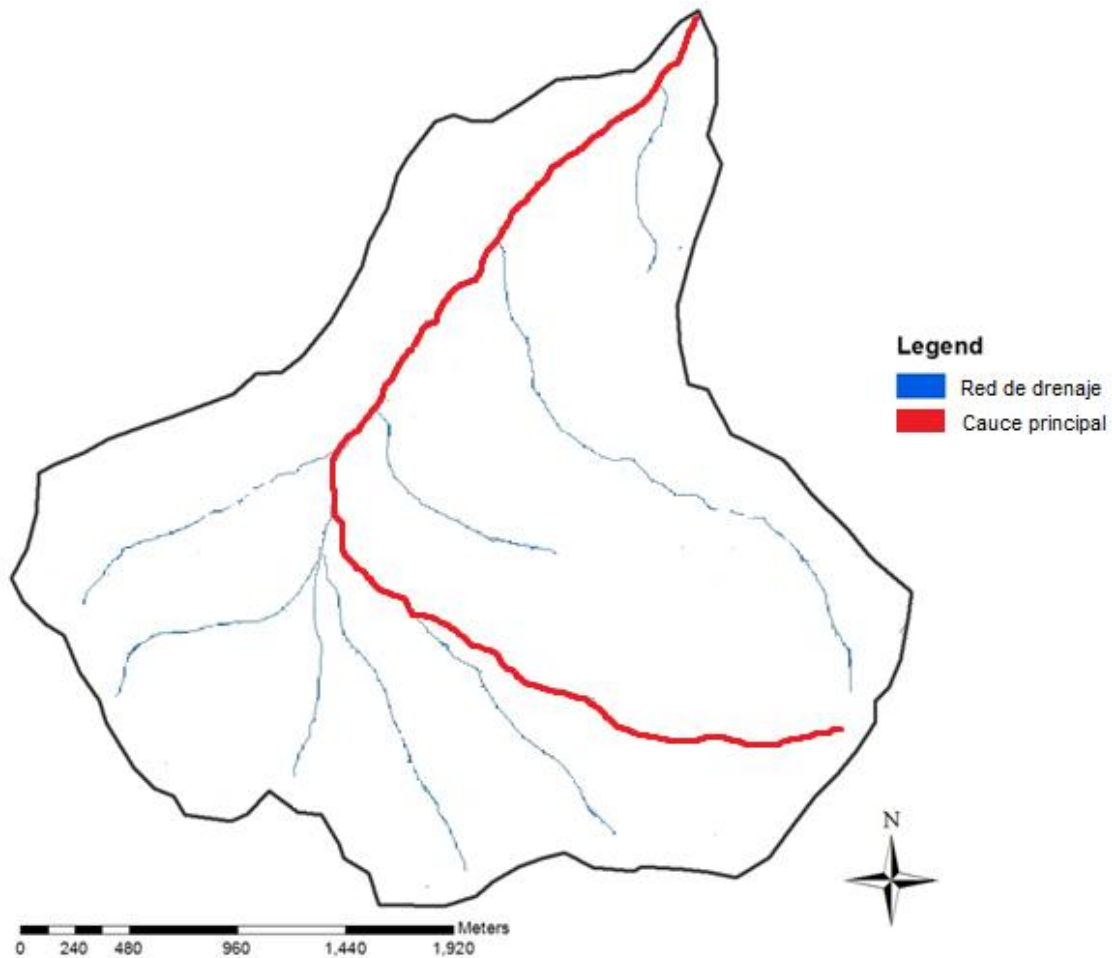


Fig. 18: Red de drenaje principal de la cuenca del arroyo de las Canteras. (Elaboración propia)

4.3. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

En lo que se refiere a la climatología de la zona, Castro del Río no presenta rasgos específicos diferenciados del resto de la campiña, y se mantiene la constante mediterránea de veranos bastante calurosos, inviernos templados-fríos y una pluviosidad media entre 470 - 550 milímetros, todo ello en un marco de cierta continentalización, producto del relativo alejamiento del mar.

El primer factor destacable es la escasa precipitación: 482 litros de media por año. Ello crea circunstancias de déficit hídrico acumulable año tras año. Éste déficit hídrico es equilibrado por la presencia de aguas procedentes de otros lugares más lluviosos como las sierras Subbéticas, lo cual juega un papel fundamental en el río Guadajoz junto a sus arroyos de la margen izquierda, verdaderos canalizadores de estos aportes paritarios. El hecho de que el 50% de las precipitaciones se concentren en tan sólo 4 meses (finales de otoño y principios de primavera), y que en los 4 meses de estiaje no se recoja más que el 10%, supone la existencia de una estación seca donde, por evaporación, se sufre la mayor parte del déficit hídrico.



Esta desigual distribución de las precipitaciones conlleva una fuerte erosión. Las lluvias muy concentradas, incluso a veces torrenciales, forman grandes escorrentías sobre el terreno, de por sí mermado en vegetación y consistencia, debido principalmente a la falta de agua y a las actividades antrópicas, como por ejemplo, la existencia de olivar en la mayor parte de la cuenca.

Estas escorrentías arrastran la capa fértil del suelo produciendo verdaderos estragos en las tierras de labor que suponen el 95% de la extensión del término.

Con respecto a las temperaturas, la media es elevada durante los meses de verano (40° en agosto) y medianamente baja de los meses de invierno (-2° en enero). Estos datos indican una alta continentalidad en el clima de Castro del Río.

El clima en general es templado y cálido. De acuerdo con Köppen y Geiger, el clima se clasifica como Csa: Mediterráneo.

Tabla 4: Clasificación climática de Köppen para la zona de Castro del Río.

GRUPO C: CLIMAS DE LATITUDES MEDIAS	Húmedos con temperatura media del mes más frío entre -3°C y 18°C, y temperatura del mes más cálido superior a 10°C	
Csa: Mediterráneo	Inviernos templados y veranos secos y cálidos. La mayor parte de las lluvias caen en invierno o en las estaciones intermedias. La vegetación natural es el bosque mediterráneo.	Se da en la costa occidental de los continentes, entre las latitudes 30° y 40°, hasta 45° en Europa: cuenca mediterránea, zonas del interior de California, y zonas del sur de Australia.

4.3.1. ESTACIÓN METEOROLÓGICA

La estación meteorológica más cercana a la cuenca del arroyo de las Canteras, se encuentra en Castro del Río, forma parte de la red de estaciones secundarias de la Agencia Estatal de Meteorología y su numeración es 5428A.

Estación. Castro del Río, SEA (5428A)

Red:	Red de Estaciones Secundarias (AEMET)
Código Estación:	5428A
Denominación:	Castro del Río, SEA
Provincia:	CORDOBA
Municipio:	CASTRO DEL RIO
Area Climática:	Alto y Medio Guadalquivir
Coordenada X(m):	369712.8
Coordenada Y(m):	4172580.36
Coordenada Z(m):	214
Tipo:	TP

Fig. 19: Información de la estación de Castro del Río (Obtenida de www.juntadeandalucia.es)

La estación meteorológica está localizada en el siguiente emplazamiento:

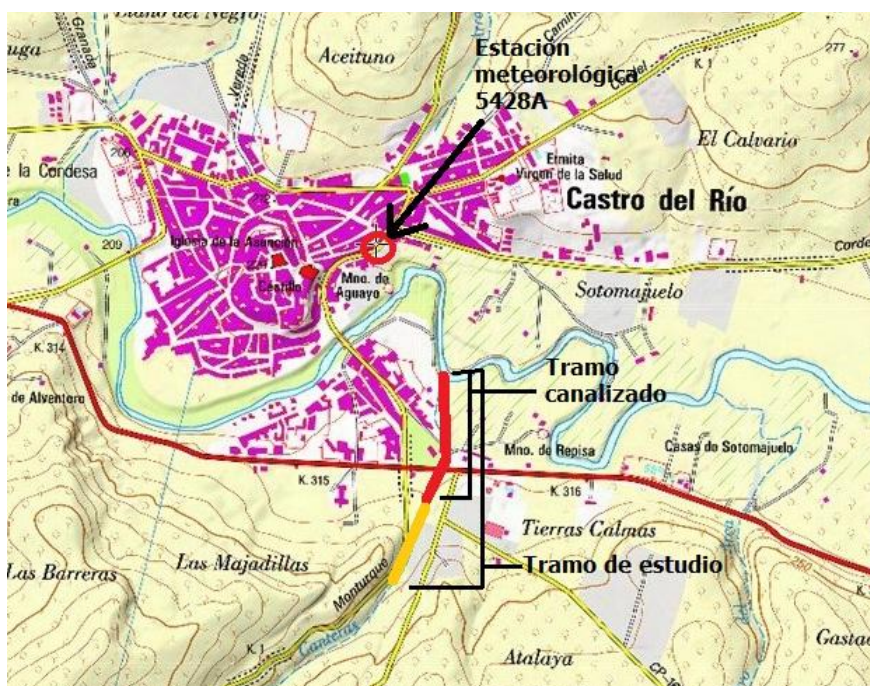


Fig. 20: Localización de la estación meteorológica y el tramo de estudio en Castro del Río.

AÑO MEDIO

El año medio realizado con los datos de dicha estación meteorológica es el siguiente:

Nombre estación: CASTRO DEL RIO 'S.E.A.'
N°: 5428A
Alt.: 230 m.
Años: 31 (1972 - 2002)

	pi	Ci	Fi	TMMCi	TMMFi	ti
Enero	56.8	24.0	-11.0	13.9	0.6	7.3
Febrero	46.7	27.0	-10.0	15.9	2.2	9.1
Marzo	38.4	32.0	-8.0	19.8	3.9	11.9
Abril	55.2	38.0	-5.5	21.6	6.1	13.8
Mayo	39.4	40.5	-0.5	26.2	9.6	17.9
Junio	16.4	45.0	5.0	32.0	13.5	22.7
Julio	2.6	46.0	6.0	36.8	16.2	26.5
Agosto	5.6	46.5	6.0	36.9	17.0	26.9
Septiembre	26.4	46.0	2.5	31.8	14.1	22.9
Octubre	58.3	39.0	-2.0	24.5	9.6	17.0
Noviembre	71.2	30.0	-7.0	18.5	4.8	11.6
Diciembre	63.9	23.0	-11.0	14.5	1.8	8.1

* **pi**: precipitación (mm) mensual media; **Ci**: temperatura (°C) mensual máxima absoluta; **Fi**: temperatura (°C) mensual mínima absoluta; **TMMCi**: temperatura (°C) mensual media de la máximas; **TMMFi**: temperatura (°C) mensual media de la mínimas; **ti**: temperatura (°C) media mensual.



ÍNDICES CLIMÁTICOS

ÍNDICE DE EMBERGER O COEFICIENTE PLUVIOMÉTRICO (Q)

El índice de Emberger se obtiene considerando la precipitación media anual, la temperatura media de las máximas del mes más cálido y la temperatura media de las mínimas del mes más frío. Este se calcula mediante la expresión:

Ecuación 5

$$Q = \frac{100 \cdot P}{2 \cdot (T_{12} + t_1) \cdot (T_{12} - t_1)}$$

**Q*: índice de Emberger o cociente pluviotérmico

**P*: precipitación media anual (mm)

**T*₁₂: temperatura media de las máximas del mes más cálido (°C)

**t*₁: temperatura media de las mínimas del mes más frío (°C)

Clasificación del clima mediterráneo según el índice de Emberger (Q) y T₁:

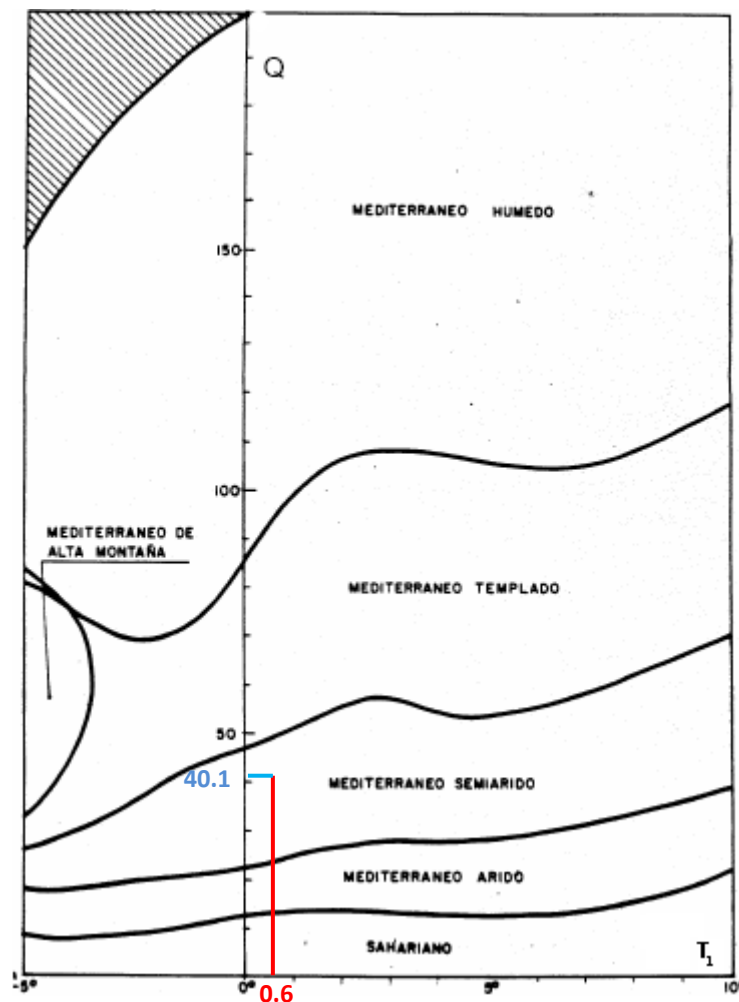


Fig. 21: Determinación del género del clima mediterráneo (Emberger. Fuente: Vera, 1989)

Según esta clasificación, el clima de Castro del Río es Mediterráneo semiárido.



ÍNDICE DE EROSIÓN POTENCIAL DE FOURNIER:

Indica el impacto potencial de la erosión en el clima:

Ecuación 6

$$K = \frac{p_i^2}{P}$$

**P_i: mes de mayor precipitación media (mm)*

**P: precipitación media anual (mm)*

Tabla 5: Clasificación de valores del Índice Modificado de Fournier (FMI), CORINE-CEC (1992)

Clase	K	Descripción
1	<60	Muy Bajo
2	60-90	Bajo
3	90-120	Moderado
4	120-160	Alto
5	>160	Muy alto

Sustituyendo los valores requeridos en la fórmula resulta un impacto potencial de Fournier alto:

$$K = 126,5$$

ÍNDICE DE MEDITERRANEIDAD DE S. RIVAS MARTINEZ

Este índice refleja la distribución anual de las precipitaciones e indica el nivel de aridez estival. Consiste en el cociente entre la evapotranspiración mensual y las precipitaciones medias de los meses estivales. Se calcula considerando sólo el mes de junio (Im1), junio y julio (Im2) o junio, julio y agosto (Im3).

Se consideran mediterráneos aquellos territorios en los que: Im1 > 1, Im2 > 1 y Im3 > 1

Ecuación 7

$$Im1 = \frac{ETP_{jl}}{P_{jl}}$$

Ecuación 8

$$Im2 = \frac{ETP_{jn} + ETP_{jl}}{P_{jn} + P_{jl}}$$

Ecuación 9

$$Im3 = \frac{ETP_{jn} + ETP_{jl} + ETP_{ag}}{P_{jn} + P_{jl} + P_{ag}}$$

**ETP: evapotranspiración calculada a partir del método de Thornthwaite (mm/mes)*

**P: precipitación media mensual (mm)*

La ETP calculada a partir del método de Thornthwaite es la siguiente:



Tabla 6: Tabla de cálculo de la ETC mensual según el método de Thornwaite

Mes	I (duración del día) (h)	nº de días del mes	Ta (tª media mensual) (°C)	a	i	I	ETP (mm/mes)
Enero	9.5	31	7.3	2.167	1.773	76.701	11.76
Febrero	10.7	29	9.1	2.167	2.476	76.701	19.98
Marzo	12	31	11.9	2.167	3.717	76.701	42.83
Abril	13.2	30	13.8	2.167	4.651	76.701	62.86
Mayo	14.4	31	17.9	2.167	6.896	76.701	124.53
Junio	15	30	22.7	2.167	9.881	76.701	210.08
Julio	14.7	31	26.5	2.167	12.490	76.701	297.54
Agosto	13.8	30	26.9	2.167	12.776	76.701	279.24
Septiembre	12.5	31	22.9	2.167	10.013	76.701	184.38
Octubre	11.2	30	17	2.167	6.378	76.701	83.82
Noviembre	10	31	11.6	2.167	3.576	76.701	33.77
Diciembre	9.3	30	8.1	2.167	2.076	76.701	13.96

Para calcular los tres índices de mediterraneidad únicamente se necesitan la precipitación media mensual y la ETP de junio, julio y agosto:

	P (mm/mes)	ETP (mm/mes)
Junio	16.4	210.082
Julio	2.6	297.544
Agosto	5.6	279.238

$$Im1 = 12,8 > 1 \quad ; \quad Im2 = 26,7 > 1 \quad ; \quad Im3 = 32,0 > 1$$

Ya que los tres índices son mayores que 1, el clima de Castro del Río es mediterráneo.

ÍNDICE DE TERMICIDAD DE S. RIVAS MARTÍNEZ:

Este índice consiste en la suma, en décimas de grado, de T (temperatura media anual), m (temperatura media de las mínimas del mes más frío) y M (temperatura media de las máximas del periodo mensual más frío multiplicado por 10).

El índice de termicidad pondera la intensidad del frío, factor limitante para muchas plantas y comunidades vegetales, junto con la temperatura media anual

Ecuación 10
$$It = 10 \cdot (T + m + M)$$

It: índice de termicidad

**M: temperatura media de las máximas del mes más frío(°C)*

**m: temperatura media de las mínimas del mes más frío (°C)*

**T: temperatura media anual (°C)*

Sustituyendo los valores requeridos:
$$It = 10 \cdot (16.3 + 0.6 + 36.9) = 374$$



PISO BIOCLIMÁTICO:

Según Rivas Martínez (1987), se entiende por piso bioclimático cada uno de los espacios que se suceden altitudinalmente, con las consiguientes variaciones de temperatura. Las unidades bioclimáticas se delimitan en función de las temperaturas, de las precipitaciones y de la distribución de ambas a lo largo del año.

A cada piso bioclimático le corresponden, una serie de comunidades vegetales que varían en función de las regiones biogeográficas, pero que mantienen grandes rasgos en común. Cada región presenta una serie de pisos definidos por la temperatura y por los taxones vegetales que los caracterizan.

Tabla 7: Principales pisos bioclimáticos de España dentro de las tres regiones corológicas, en función de sus constantes climáticas más características. Rivas Martínez, 1987.

Regiones corológicas	Piso	T	M	m	It
Eurosiberiana	Alpino	< 3	< 0	< -7	< -40
	Subalpino	3 a 7	0 a 3	-7 a -4	-40 a 60
	Montano	7 a 12	3 a 10	-4 a 2	60 a 240
	Colino	> 12	> 10	> 2	> 240
Mediterránea	Crioromediterráneo	< 4	< 0	< -7	< -30
	Oromediterráneo	4 a 8	0 a 3	-7 a -4	-30 a 70
	Supramediterráneo	8 a 13	3 a 8	-4 a -1	70 a 200
	Mesomediterráneo	13 a 17	8 a 14	-1 a 5	200 a 360
	Termomediterráneo	17 a 19	14 a 18	5 a 10	360 a 470
Macaronésica	Supracanario	<11	< 10	<3	< 240
	Mesocanario	11 a 15	10 a 14	3 a 7	240 a 360
	Termocanario	15 a 19	14 a 18	7 a 11	360 a 480
	Infracanario	> 19	> 18	> 11	> 480

**T: temperatura media anual (°C)*

**M: media de las mínimas del mes más cálido (°C)*

**m: media de las mínimas del mes más frío (°C)*

**It: índice de termicidad de Rivas Martínez*

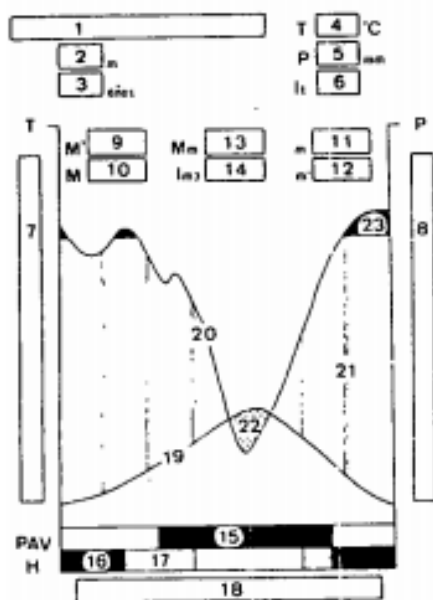
En el caso de Castro del Río, los valores de las variables son: T = 16,3; M = 16,2 °C; m = 0,6 °C y It = 374, por lo que el piso bioclimático correspondiente se encuentra entre Mesomediterráneo y Termomediterráneo

CLIMODIAGRAMA DE WALTER Y GAUSSEN (DIAGRAMA OMBROTÉRMICO):

De acuerdo al método de clasificación bioclimática diseñado por Gaussen, el climodiagrama establece que la distribución de la temperatura y la precipitación durante el curso del año, tiene mayor importancia que sus medias anuales. Esta clasificación se basa en el ritmo de la temperatura y precipitación en el curso del año, tomando en consideración los períodos que son favorables o desfavorables para la vegetación.

El climodiagrama representa gráficamente los valores mensuales de la temperatura y precipitación, que se registran en una estación meteorológica.

Los parámetros representados en el diagrama y su localización son los siguientes:



1. Estación meteorológica
2. Altitud (m)
3. Años de observación
4. Temperatura media anual (°C)
5. Precipitación anual (mm)
6. Índice de termicidad
7. Escala de temperaturas (°C)
8. Escala de precipitaciones (mm de agua de lluvia)
9. Temperatura máxima absoluta del mes más cálido (°C)
10. Temperatura media de las mínimas del mes más cálido (°C)
11. Temperatura media de las mínimas del mes más frío (°C)
12. Temperatura mínima absoluta del mes más frío (°C)
13. Temperatura media de las máximas del mes más frío (°C)
14. Índice de mediterraneidad (Im₃)
15. Periodo de actividad vegetal (PAV)
16. Periodo con heladas seguras
17. Periodo con heladas probables
18. Meses
19. Curva de la temperatura media mensual
20. Curva de precipitación media mensual
21. Periodo húmedo
22. Periodo seco
23. Precipitación superior a 100 mm

Fig. 22: Parámetros de un diagrama ombrotérmico o climodiagrama. (Rivas-Martínez. Pisos bioclimáticos de España)

Con los parámetros obtenidos anteriormente y los datos del año medio, se ha elaborado el diagrama ombrotérmico de Castro del Río para un periodo de observación de 31 años.

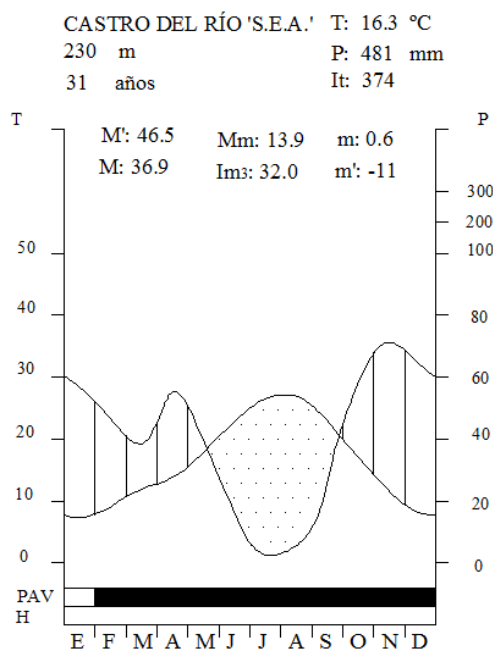


Fig. 23: Diagrama ombrotérmico o climodiagrama de Castro del Río, Córdoba. (Elaboración propia)



4.4. GEOLOGÍA Y EDAFOLOGÍA

El objetivo del estudio geológico es proporcionar la información necesaria para la caracterización de las unidades geológicas que afloran a lo largo del trazado planteado, y con ello, servir de base a los estudios y cálculos en los que intervengan las características de estas litologías.

En primer lugar, se sintetizará el marco geológico general en el que se enmarca la actuación. Seguidamente, se procederá a la descripción de las formaciones geológicas existentes. Además, se expone el contexto geomorfológico, hidráulico e hidrogeológico de la zona.

Para la elaboración de este estudio se han realizado visitas a campo y se han recopilado datos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos relativos a la zona de estudio mediante cartografía.

Se procederá a realizar una descripción y caracterización geológica general de los distintos tipos de materiales que componen las formaciones que afloran en la zona de estudio y que tienen representación en la cartografía geológica consultada para este proyecto.

4.4.1. CONTEXTO GEOLÓGICO

A grandes rasgos y con el apoyo de lo anteriormente mencionados, se puede concluir que la zona de estudio, a nivel regional, se sitúa en la Depresión de la Cuenca del Guadalquivir, constituida prácticamente en su totalidad por materiales pertenecientes a la llanura de inundación del río Guadalquivir y al sistema de terrazas aluviales del mismo.

Dicha cuenca es una depresión de forma triangular, alargada en dirección NE-SO, que contiene un gran espesor de sedimentos (fundamentalmente margas) depositados durante el Neógeno.

La superficie topográfica desciende paulatinamente desde el extremo oriental (cotas superiores a 800 m) hacia el Oeste, hasta la costa del Golfo de Cádiz, y persiste con la misma tendencia bajo el mar, donde la sedimentación continúa en la actualidad.

Está situada entre las Cordilleras Béticas (al Sur) y el Macizo Hercínico de la Meseta (al Norte), y su extremo oriental está constituido por los afloramientos Mesozoicos Prebéticos de la Sierra de Cazorla, con altitudes superiores a los 2000 m.

En la siguiente imagen se muestra la localización de la cuenca del arroyo de las Canteras sobre un mapa geológico regional de las cordilleras béticas:

Cuenca del arroyo de las Canteras

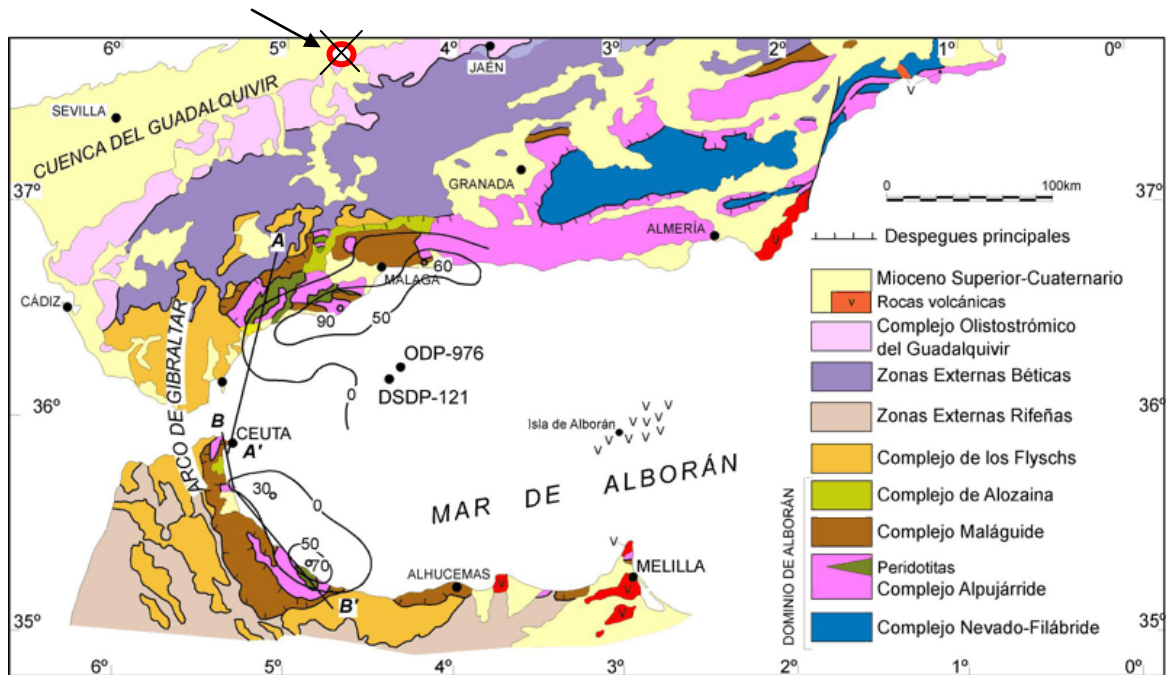


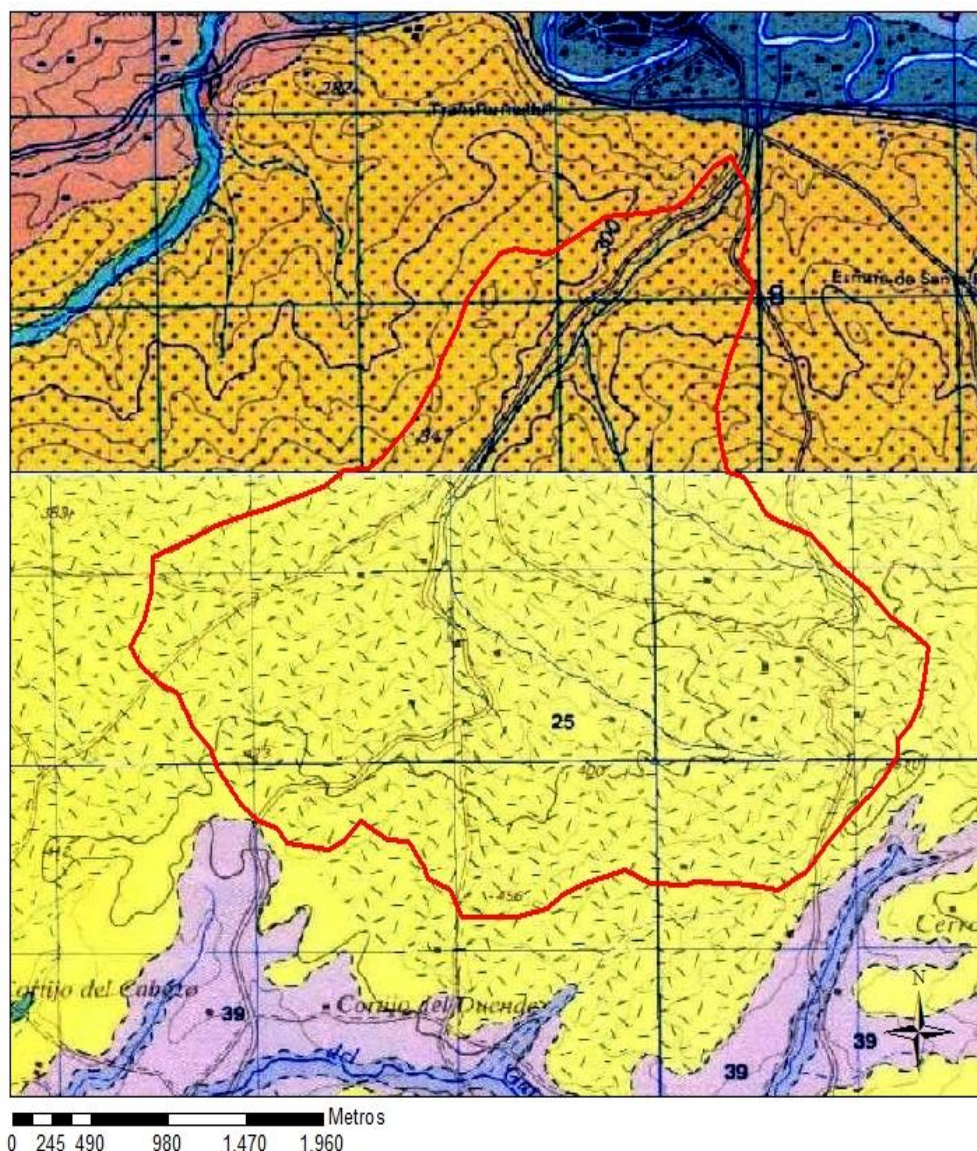
Fig. 24: Encuadre geológico regional de las cordilleras Béticas. (Vera J.A., 2004)

Su génesis y evolución están estrechamente relacionadas con la sucesión de acontecimientos que han configurado el Orógeno Bético, ya que la Cuenca del Guadalquivir ha constituido durante el Neógeno la cuenca de antepaís de las Béticas.

Así, a lo largo del Mioceno, el dominio paleogeográfico que nos ocupa, pasó de ser una franja de conexión entre el Océano Atlántico y el Mediterráneo a cerrarse por cabalgamiento y emersión del Prebético en el sector de Cazorla. De esta forma, la parte occidental de este estrecho, todavía sumergida bajo el océano, constituye la Cuenca del Guadalquivir, cuyos sedimentos fueron emergiendo progresivamente de Este a Oeste hasta su posición actual debido a la elevación generalizada de la Cordillera.

4.4.2. CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL. ZONA DE ACTUACIÓN

Según el mapa MAGNA50 del Instituto Geográfico Nacional, se observa que, en la ubicación de la cuenca del arroyo de las Canteras, la totalidad de la cuenca, y por lo tanto toda la zona de actuación, está formada por margas blancas arenosas.



ZONAS EXTERNAS

FORMACIONES PARA-AUTOCTONAS Y/O ALOCTONAS

TERCIARIO	NEOGENO	MIOCENO	MEDIO	SERRAVAL.	
				LANGHIENSE	
				BURDIGAL.	
				AQUITAN.	
	PAL.	OLIGOCENO			

- 32 Conglomerados de cantos mesozoicos. Abanico aluvial.
- 31 Conglomerados y arenas. Terraza Río Marbella.
- 30 Conglomerados y arenas. Terraza Río Guadalmoral.
- 29 Conglomerados y arenas. Terraza alta. Río Guadajoz.
- 28 Conglomerados, arenas y limos.
- 27 Conglomerados, arenas y margas.
- 26 Calizas y margocalizas bioclásticas blancas.
- 25 Margas blancas arenosas. (albarizas y/o moronitas).

Fig. 25: Mapa litológico nacional del arroyo de las Canteras. (Obtenido de Magna50)

Según el Instituto Geológico y Minero, para la zona del arroyo de las Canteras, situada en las hojas MTN50 numeradas como 0945 (Castro del Río) y 0967 (Baena) aparecen un conjunto de margas arenosas de color blanco llamadas “albarizas” y/o “moronitas”. Formadas en el Aquitaniense-Serravaliense.



Las “moronitas” denominación local dada a las margas con diatomeas encontradas cerca de Morón de la Frontera (Sevilla) por Calderón y Paul en 1886, tienen una amplia distribución por toda la cuenca del Guadalquivir, desde Jaén hasta Sanlúcar de Barrameda (Cádiz).

En el área de la cuenca de las Canteras, esta formación tiene un carácter más “albarizoide”, sobre todo por la presencia de calizas bioclásticas intercaladas, que son muy infrecuentes en las moronitas típicas.

Las albarizas constituyen un grupo litológico y por tanto cartográfico muy homogéneo y extendido.

Del estudio micropaleontológico se deduce que no hay gran variabilidad en cuanto al medio de depósito y su ubicación, tratándose de depósitos carbonatados marinos de plataforma externa o incluso más profunda, con cierta componente bentónica. Las condiciones térmicas se mantendrán bastante estables y uniformes, oscilando en el rango de las isothermas cálidas a templadas frías, en aguas limpias, oxigenadas y tranquilas.

Por otra parte, para estudiar la edafología, se ha consultado el mapa edafológico digital a escala 1:1.000.000, editado en el año 2001 por el Sistema Español de Información de Suelos, que emplea la taxonomía de suelos de USDA (Soil Taxonomy) según la clasificación de la FAO/UNESCO.



Fig. 26: Mapa edafológico digital obtenido de (<http://www.arcgis.com>. Fuente: FAO)



Vertisol Crómico sobre margas blancas arenosas

Según la FAO, el término vertisol deriva del vocablo latino "vertere" que significa verter o revolver, haciendo alusión al efecto de batido y mezcla provocado por la presencia de arcillas hinchables.

El material original lo constituyen sedimentos con una elevada proporción de arcillas esmectíticas, o productos de alteración de rocas que las generen.

Se encuentran en depresiones de áreas llanas o suavemente onduladas. El clima tener estaciones contrastadas en cuanto a humedad. El perfil es de tipo ABC.

La alternancia entre el hinchamiento y la contracción de las arcillas, genera profundas grietas en la estación seca y la formación de superficies de presión y agregados estructurales en forma de cuña en los horizontes subsuperficiales.

La mayor parte del horizonte B tiene un matiz de 7.5 YR y una pureza en húmedo mayor de 4, o un matiz más rojo que 7.5 YR.



Fig. 27: Suelo Vertisol Crómico.
(Obtenido de www.edafología.net)

Cambisol Cálculo sobre margas blancas arenosas

Los suelos Cambisol son los que presentan mayor extensión en la zona. Según la FAO son suelos medianamente evolucionados, pobres en materia orgánica y presentan un perfil tipo A-(B)-C en el que puede aparecer un horizonte cámbico (B) que presenta un moderado grado de evolución.

Son tierras pardas originadas sobre roca ácida, por lo que el perfil del suelo presenta características de ligeramente ácido. Su posición fisiográfica les ha impedido en la mayoría de los casos evolucionar.

El Cambisol cálcico suele tener una capa mayor de 15 cm de espesor, enriquecida de carbonatos secundarios, en una proporción mayor de 15 %, al menos en los 125 cm superficiales.

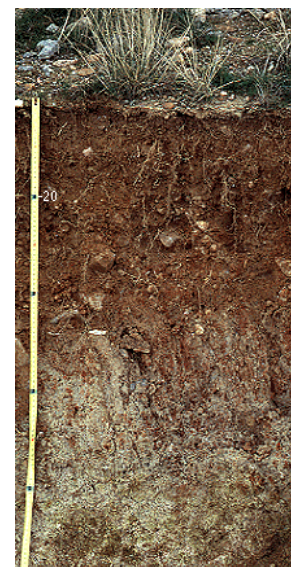


Fig. 28: Suelo Cambisol Cálculo.
(Obtenido de www.edafología.net)



4.4.3. GEOMORFOLOGÍA

En conjunto la zona se clasifica como “ámbito geomorfológico de Campiña” y se caracteriza por presentar un relieve muy llano, ya que sus pendientes que apenas sobrepasan el 3%.

El relieve existente en la zona de Castro del Río es muy homogéneo. Está constituido en su mayoría por formas suaves de lomas redondeadas. Dicho relieve se conforma a partir de materiales principalmente margosos de edad neógena. En ocasiones y esporádicamente suelen aparecer algunos salientes de componente calcárea más resistentes a la erosión.

La cota máxima no supera los 600 m de altitud y la mínima está en torno a los 200 m; como puede verse las diferencias de cotas son inferiores a 400 m lo que le confiere una suavidad al relieve.

Cómo dato importante, cabe destacar que la zona de estudio presenta zonas bastante inestables debido a las cárcavas producidas por la erosión.

4.4.4. MORFOLOGÍA FLUVIAL

La morfología fluvial está controlada por el relieve, las lluvias y la naturaleza del sustrato. El relieve es muy suave, las lluvias son generalmente escasas y muy periódicas y el sustrato bastante impermeable.

Todos estos factores condicionan que los cursos fluviales no sean permanentes en la mayoría de los casos y que el fondo de los mismos sea normalmente en cuña o plano y rara vez se encuentren los barrancos encajados. En ocasiones existen procesos de generación de cárcavas próximos a la desembocadura de los arroyos con el Río Guadajoz.

Estos fenómenos se producen, casi exclusivamente, por la acusada diferencia de cota entre ambos, que condicionan un proceso erosivo relativamente importante para equilibrar el relieve.

El único curso fluvial perteneciente de cierta entidad, alimentado de los relieves subbéticos situados al Sur, es el Río Guadajoz. Dicho río ha experimentado una dinámica relativamente activa en épocas pasadas, como así lo atestiguan las terrazas altas que marcan principalmente la margen derecha del mismo.

Asociadas al Río Guadajoz, se observan tres terrazas, la mencionada con anterioridad, otra representada a media ladera de la margen derecha de dicho río y la que está muy próxima al cauce actual y constituye ocasionalmente el lecho de inundación.

La terraza alta está cementada y deslizada como consecuencia de procesos de deslizamiento de ladera. La Terraza media está poco cementada y ocasiona derrubios con frecuencia. La Terraza baja o lecho de inundación no está cementada y a veces es objeto de explotación para áridos.

En todos los casos los materiales proceden de relieves subbéticos situados en posiciones meridionales, las granulometrías son variables (arenas y gravas) y el grado de redondez es alto. En la actualidad el Río Guadajoz produce un proceso erosivo poco acusado, ya que el desnivel que tiene que salvar en la zona de estudio es inferior al 0,3%.

Finalmente conviene señalar aquellos depósitos coluviales que rellenan los fondos de valle constituidos esencialmente por arcillas. Son producto del desmantelamiento superficial de las margas que configuran el sustrato más preponderante en el área de estudio. Dichos depósitos se generan a partir de las tormentas, que los transportan en masa hasta las zonas más deprimidas.

4.5. USOS DEL SUELO Y VEGETACIÓN

4.5.1. USOS DEL SUELO

Para la identificación de los usos del suelo, a escala de la cuenca vertiente, se ha utilizado el Mapa de Usos del suelo del SIOSE, el Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España, cuyo objetivo es integrar la información de las Bases de Datos de coberturas y usos del suelo de las Comunidades Autónomas y de la Administración General del Estado. Está editada por la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (Ministerio de Fomento), como «Centro Nacional de Referencia de Ocupación del Suelo» (CNR-OS), dependiente del «Punto Focal Nacional» (Ministerio de Medio Ambiente), apoyándose en la Red EIONET.

El SIOSE se enmarca dentro del Plan Nacional de Observación del Territorio en España (PNOT), que coordina y gestiona el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).

En base a la información aportada por el mapa realizado delimitando polígonos mediante ArcGIS, se observa que prácticamente la totalidad de la cuenca está cubierta actualmente por olivar, exceptuando los márgenes del arroyo, los cuales que presentan una estrecha franja de vegetación natural formada por una cubierta de matorral y pastizal.



Fig. 29: Fotografía ejemplo de vegetación natural existente en la cuenca. (Fotografía propia. Julio 2014)

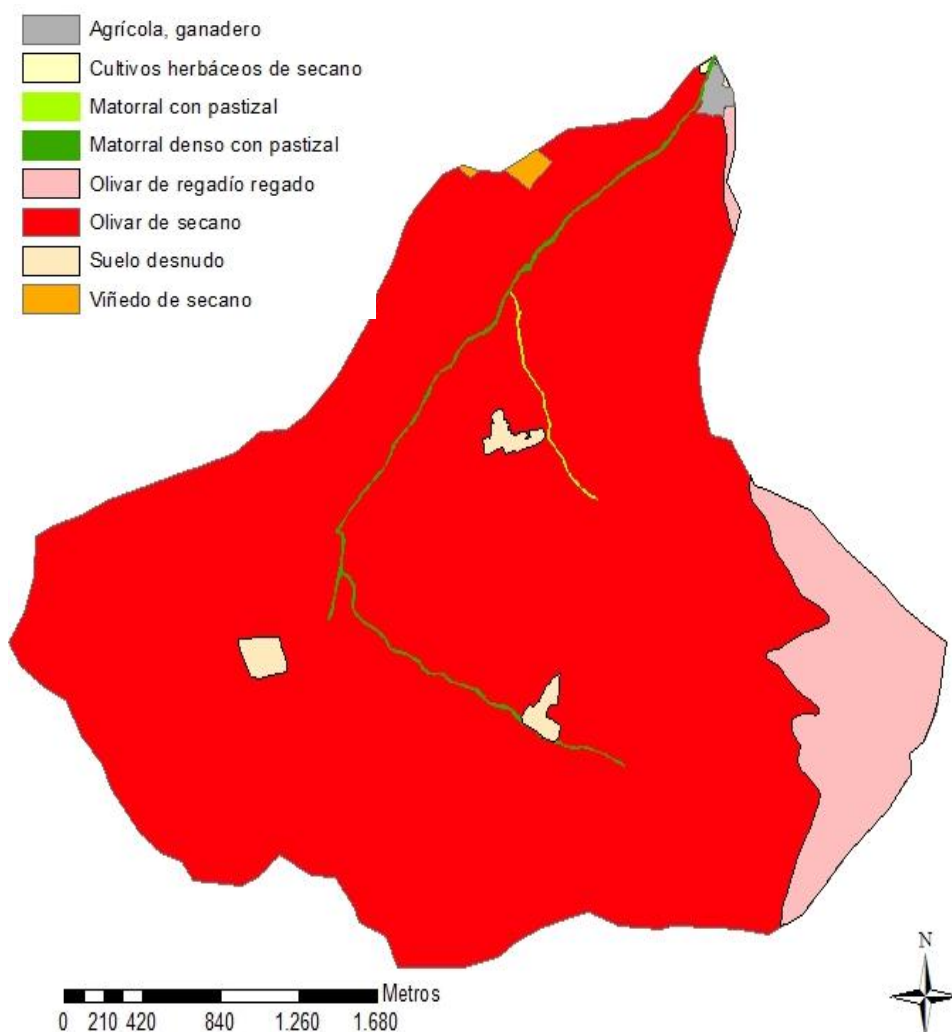


Fig. 30: Mapa de usos del suelo de la cuenca del arroyo de las Canteras. (Elaboración propia)

4.5.2. VEGETACIÓN

Como ya se ha visto anteriormente, la cuenca del arroyo de las Canteras no existe prácticamente vegetación natural ya que el 98% del espacio se encuentra antropizado, salvo en estrechas zonas de un par de metros a los lados de los cauces ya que toda la cuenca se encuentra cultivada.

Las especies arbóreas más representativas de los cursos fluviales de la zona son: taraje (*Tamarix canariensis* Willd.), olmo (*Ulmus minor* Mill.), álamo (*Populus alba* L.), chopo (*Populus nigra* L.), fresno (*Fraxinus angustifolia* Vahl.) y eucaliptos (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.). Las especies herbáceas y arbustivas principales son: caña (*Arundo donax* L.), carrizo (*Phragmites australis* Cav.) enea (*Typha domingensis* Pers.), zarza (*Rubus ulmifolius* Schott.) y aladierno (*Rhamnus alaternus* L.).

Las especies arbóreas más representativas no ligadas a los cursos de agua son el acebuche (*Olea europea L.*), encina (*Quercus ilex L.*) y quejigo (*Quercus faginea Lam.*).

Observando el Mapa Forestal de España (MFE a escala 1:2.000.000) se puede verificar que efectivamente no existen masas de vegetación importantes.

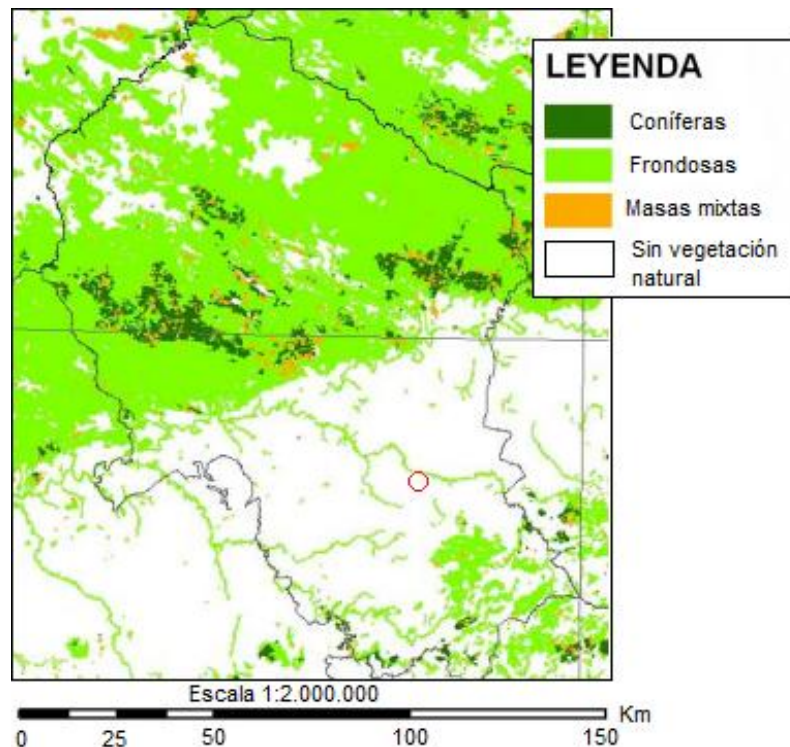


Fig. 31: Mapa Forestal de España, Provincia de Córdoba 1:2.000.000. (Obtenido de <http://www.magrama.gob.es/>)

Ya que actualmente no existe vegetación natural en la zona, se ha descrito la vegetación potencial, es decir, la vegetación más evolucionada que se alcanzará en un lugar determinado si cesan las causas que motivaron su degradación.

Mientras que la vegetación potencial sólo dice, de forma teórica, qué vegetación es la que podrá existir dentro de mucho tiempo en un territorio, la serie de vegetación indica todas las comunidades que hay o puede haber en un territorio, la dinámica de las mismas y la vegetación potencial.

Otro término importante es la vegetación clímax. Cuando en una sucesión vegetal, se consigue una comunidad que está en perfecta armonía consigo misma y con los factores ecológicos del medio se dice que ha alcanzado el clímax, el calificativo de clímax está relacionado con el término “climácico”.

Para diferenciar ambos términos, la vegetación potencial se refiere a una “tendencia”, mientras que clímax se refiere a un “estado”.

Rivas Martínez (1987), define serie de vegetación como: “Unidad geobotánica, sucesionista y paisajística que trata de expresar todo el conjunto de comunidades vegetales que pueden hallarse en espacios teselares afines como resultado del proceso de la sucesión, lo que incluye tanto los tipos de vegetación representativos de la etapa madura del ecosistema vegetal como de las etapas iniciales o subseriales que los reemplazan”. Es decir, una serie de vegetación estaría constituida por un conjunto de comunidades (bosque, matorrales, pastizales, ...), que viven en un territorio concreto (biogeografía), bajo unas determinadas características ecológicas (bioclima, roca, suelos, ...) y que todas tenderían, en la dinámica temporal, hacia la misma comunidad estable y madura (clímax).

Para conocer el tipo de vegetación que le corresponde a la cuenca del arroyo de las canteras, hay que saber en qué piso bioclimático se encuentra. Se observa en el siguiente mapa:

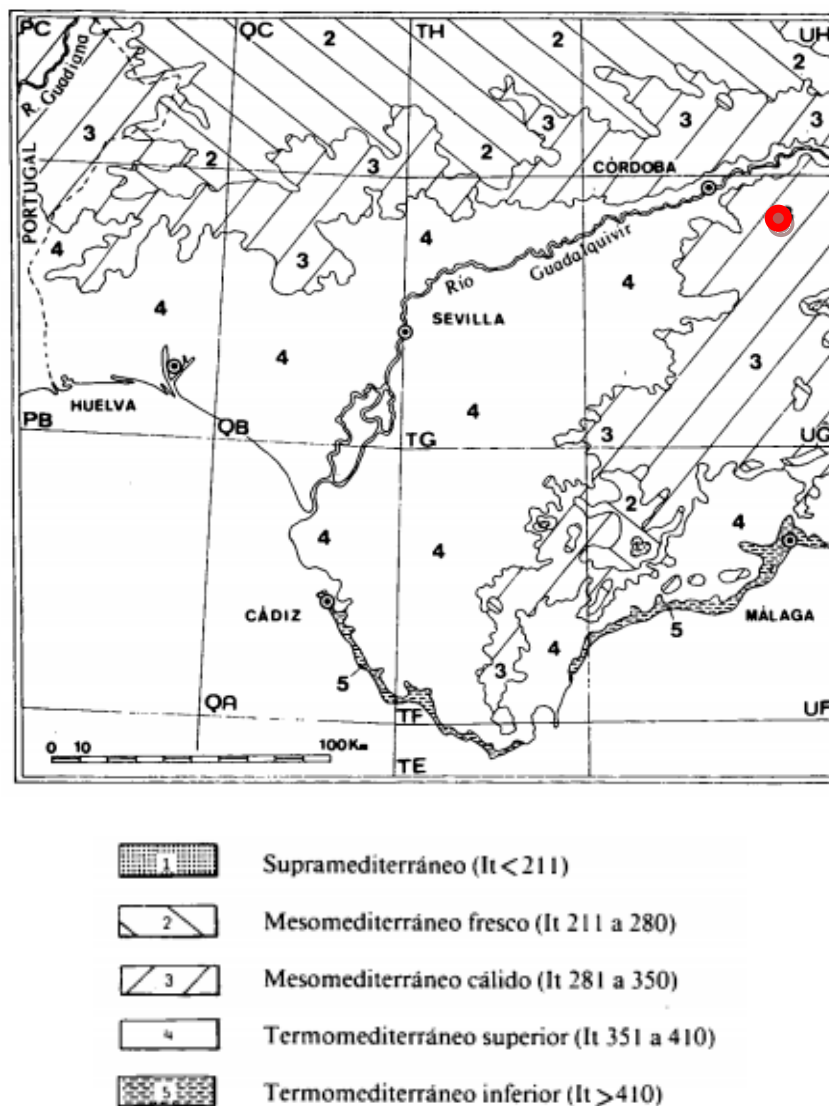


Fig. 32: Mapa de pisos bioclimáticos de Andalucía Occidental. (Obtenido de Bioclimatología, biogeografía y series de vegetación de Andalucía occidental, S. Rivas-Martínez)

El clima Mesomediterráneo cálido se caracteriza por poder encontrarse en cualquier área de clima mediterráneo. Se encuentra situado entre el clima termomediterráneo y el clima supramediterráneo. Dependiendo de la latitud y otros factores, la altitud a la que se encuentra es variable, aunque se trata en todos casos de un clima típicamente mediterráneo, con heladas en invierno y temperaturas elevadas en verano en el que se produce estrés hídrico. La vegetación se caracteriza normalmente por bosques de esclerófilos, fundamentalmente encinas.

La serie de vegetación correspondiente a la cuenca se señala en el siguiente mapa:

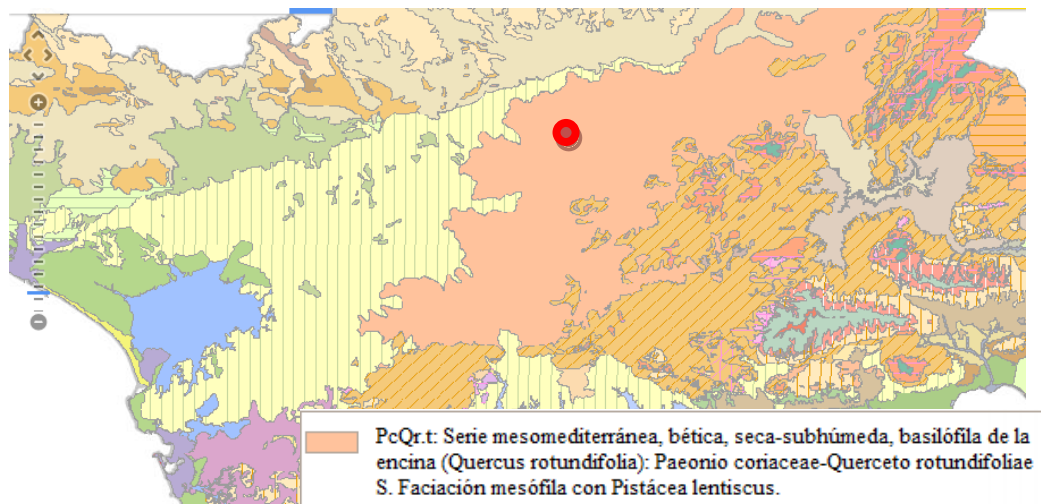


Fig. 33: Mapa de Series de vegetación de Andalucía. (Obtenido de www.juntadeandalucia.es)

Con respecto al mapa de vegetación potencial, a la cuenca le corresponde un bosque mediterráneo subhúmedo formado por encinar o alcornocal.

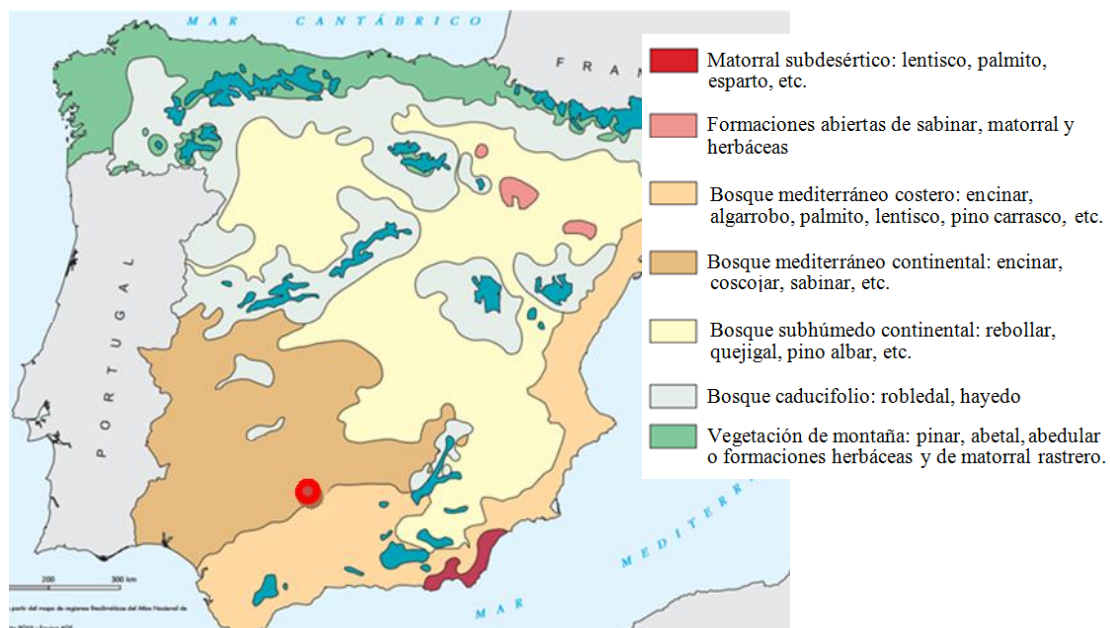


Fig. 34: Mapa de vegetación potencial de España. (Fuente: www.ign.es)

Según lo indicado anteriormente, a la cuenca del arroyo de las Canteras le corresponde un bosque mediterráneo subhúmedo dominado por encinar de *Quercus ilex* L. combinado con lentisco (*Pistacea lentiscus* L.) como en la siguiente fotografía:



Fig. 35: Ejemplo de vegetación potencial en la cuenca del arroyo de las Canteras. (Obtenida de: barresfotonatura.com)

4.6. FAUNA

La fauna de la cuenca del arroyo de las Canteras está limitada ya que no existen masas arboladas ni suficiente superficie con vegetación natural. La mayoría de la cuenca está cubierta por olivar a suelo desnudo. sin embargo, ecosistema dominante en la cuenca es el ecosistema de la campiña.

En este tipo de ecosistema característico las especies esteparias más representativas son: la carraca (*Coracias garrulus*), el sisón (*Tetrax tetrax*), el aguilucho cenizo (*Circus pygargus*), la cogujada (*Galerida cristata*), la perdiz (*Alectoris rufa*), la codorniz (*Coturnix coturnix*), la tórtola (*Streptopelia turtur*) en grave decadencia, el alcaudón común (*Lanius senator*), la collalba rubia (*Oenanthe hispanica*), el alzacola (*Cercotricas galactotes*), la calandria (*Melanocorypha calandra*), etc.

Las rapaces nocturnas más destacadas son la lechuza (*Tito alba*), el mochuelo (*Athene noctua*), el autillo (*Otus scops*), el búho real (*Bubo bubo*), el cárabo (*Strix aluco*) y el búho chico (*Asio otus*).

Con respecto a pequeñas aves existen cuatro especies de hirundínidos: golondrina común (*Hirundo rustica*), golondrina dáurica (*Hirundo daurica*), avión zapador (*Riparia riparia*) y avión común (*Delichon urbica*). En toda la cuenca se pueden encontrar una gran cantidad de paseriformes, además, se pueden destacar las grandes bandadas de zorzales y currucas que aprovechan la maduración de la aceituna para su alimentación en invierno.

Los mamíferos más representativos son: erizo común (*Erinaceus europaeus*), el conejo (*Oryctolagus cuniculus*), el zorro (*Vulpes vulpes*), la liebre (*Lepus europaeus*), la comadreja (*Mustela nivalis*), el murciélago común (*Pipistrellus pipistrellus*), la rata (*Rattus norvegicus*) y el ratón campestre (*Apodemus sylvaticus*).

Con respecto a los reptiles, se puede destacar la salamanquesa (*Tarentola mauritanica*), la culebra de agua (*Natrix maura*) y el lagarto ocelado (*Lacerta lepida*).

4.7. ESTADO SOCIOECONÓMICO



Fig. 36: Campanario de Castro del Río y paisaje. (Obtenido de www.ayuntamientocastrodelrio.org)

Castro del Río es una localidad de la provincia de Córdoba, Andalucía, España.

Su extensión superficial es de 218 km² y tiene una densidad de 37,1 hab/km². Se encuentra a una altitud media de 227 metros y a 42 km de la capital de provincia, Córdoba. Por Castro del Río pasa el río Guadajoz, afluente del río Guadalquivir en el cual desemboca el arroyo de las Canteras.

La diversidad litológica anteriormente vista en el apartado de geología, no supone un cambio radical en el relieve, pero sin embargo, introduce variantes que pueden romper la monotonía de las formas de la Campiña e introduce líneas más vigorosas, mayores pendientes y abundancia de barranqueras y cárcavas, lo que limita los posibles aprovechamientos y usos que se pueden realizar en la zona. Esta diferenciación suele tener repercusiones económicas, pues los suelos formados sobre los materiales anteriormente descritos, en presencia de calizas, yesos, que suelen ser pobres y se orientan fundamentalmente al cultivo de olivar.

Aunque las lluvias, no demasiado abundantes, difícilmente pueden modificar las condiciones agrarias de Castro respecto de su entorno, sí que puede hacerlo su hidrografía, pues la presencia del Guadajoz, cruzando de este a oeste el término, en su camino hacia el Guadalquivir, determina la presencia de zonas irrigadas cercanas al cauce que, superficialmente, poseen una envergadura mayor a la habitual en la campiña.

Con respecto a la población, el año 2008 contaba con 8.114 habitantes. En su evolución hay que resaltar la importante pérdida por emigración acontecida en las décadas 50 y 60 del pasado siglo, como consecuencia de la mecanización del campo andaluz y de su estructura latifundista. En el periodo más reciente su población mantiene una tendencia



ligeramente al alza alimentada vía inmigración, fenómeno presente en toda la zona del entorno atraída por ocupación en el sector agrícola y de la construcción. Precisamente la actual situación de crisis económica resentirá esa atracción inmigratoria y sus efectos demográficos.

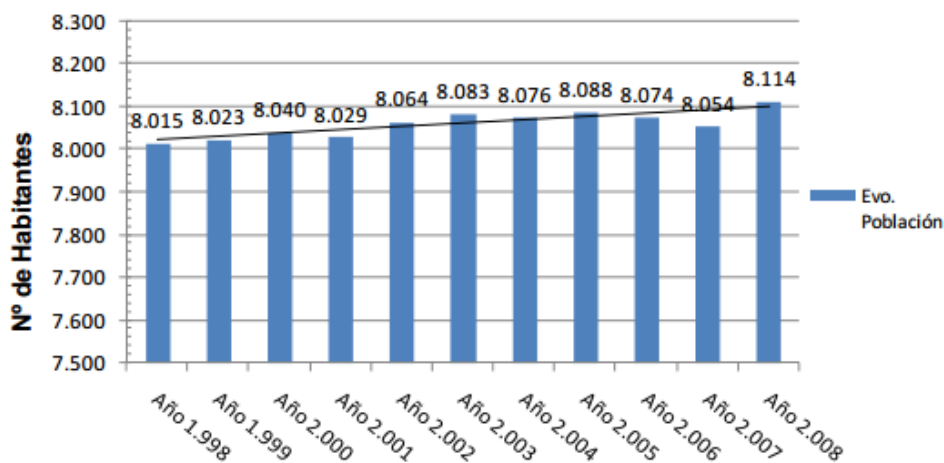


Fig. 37: Evolución de la población (1998-2008). (Fuente: INE 2007)

En cuanto a la distribución de la población de Castro según grupos de edad, en la tabla adjunta se pueden observar sus principales características.

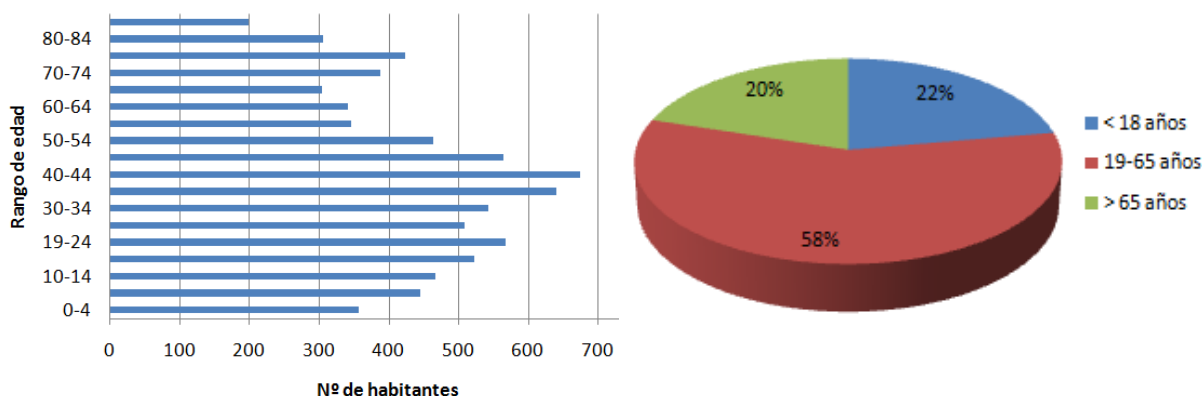


Fig. 38: Distribución de la población por grupos de edad. (Fuente: INE 2007)

Para una aproximación de síntesis sobre la distribución por edad de la población de Castro del Río, ésta se ha agrupado en tres grupos básicos: jóvenes (menores de 18 años), adultos (entre 19 y 65 años) y tercera edad (mayores de 65 años).

La población mayor de 65 años supone el 20,08% de la población total, los menores de 18 años representan el 22,24% y las personas de entre 18 y 65 años suponen el 57,68%, siendo el grupo con más peso. El tamaño relativo de los grupos de edad responde a la



distribución de nuestro entorno, de manera que existe una reducida población infantil y un gran cuerpo de población adulta.

Con respecto al empleo y nivel de renta, de la población del municipio de Castro del Río, 3.470 personas pertenecen al grupo de la Población Activa (42,9%), de las cuales el 65,30% están ocupadas y el 34,7% en paro.

La población activa de Castro del Río se ha incrementado en un 23,5% en las dos últimas décadas pasadas debido, fundamentalmente, a la incorporación de la mujer al mundo laboral. En dicho periodo, la tasa de actividad de la mujer ha pasado del 8,81% al 40,9%. Por el contrario, en los hombres se ha producido una progresiva disminución, descendiendo un 5,59% con respecto a los años 80.

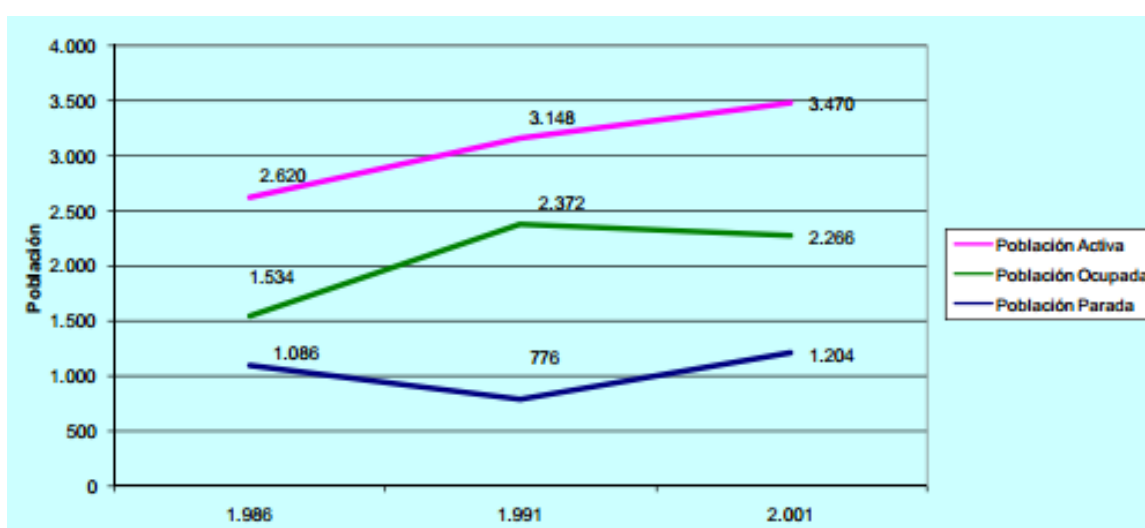


Fig. 39: Evolución de la población activa. (Fuente: IEA. SIMA. Censo de Población 86/91/2001)

A falta de datos oficiales correspondientes a la actual década, es de esperar al menos una cierta ralentización de ese proceso, tal vez acelerado actualmente por la coyuntura económica general de crisis.

El tamaño de las empresas de Castro del Río es reducido, ninguna de ellas supera los 50 empleados, y tan solo una S.A. cuenta con más de 20 trabajadores.

En la estructura de la población activa de Castro se produce un importante cambio ya con los datos del censo de 2.001, pasando de ser una estructura dependiente del sector primario (agrícola fundamentalmente) a otra en la que el terciario ocupa mayor población.

Debe resaltarse asimismo la alta proporción de población ocupada en el sector construcción, casi el 19 %. La población ocupada en actividades industriales, como consecuencia de lo anterior, es muy reducida (8,9%).

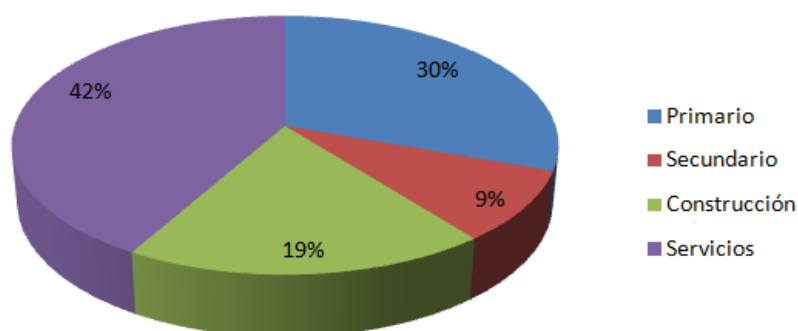


Fig. 40: Distribución de la población según el tipo de sector laboral. (Fuente: IEA. SIMA. Censo de Población 86/91/2001)

Como se puede observar, la actividad agraria en conjunto, supone un medio de vida muy importante para la población, muy por encima del sector industrial. La actividad económica de Castro ha estado vinculada históricamente con el sector agrícola, destacando los cultivos de la clásica triada mediterránea (olivar, cereales y viñedo, por este orden) y la huerta vinculada a los regadíos del Guadajoz.

En industria es de destacar su tradicional actividad artesana sobre madera de olivo, fundamentalmente sillería

5. CARACTERIZACIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO

Para concluir la caracterización, se analizará concretamente el tramo de arroyo objeto de estudio. Es un tramo de longitud 520 metros, de los cuales 440 se encuentran canalizados.

El tramo discurre desde las últimas parcelas con vivienda situadas a las afueras del municipio por el sur de este, hasta su desembocadura en el río Guadajoz. La localización exacta se puede ver en el apartado 3 de este anejo llamado: *localización del tramo*.

Además, en este apartado se realiza el análisis del parcelario catastral que se ve influido por la actuación y el medio natural de la zona en cuestión.

5.1. PARCELARIO CATASTRAL

En cuanto al parcelario catastral, la cartografía de la zona de actuación es la siguiente:

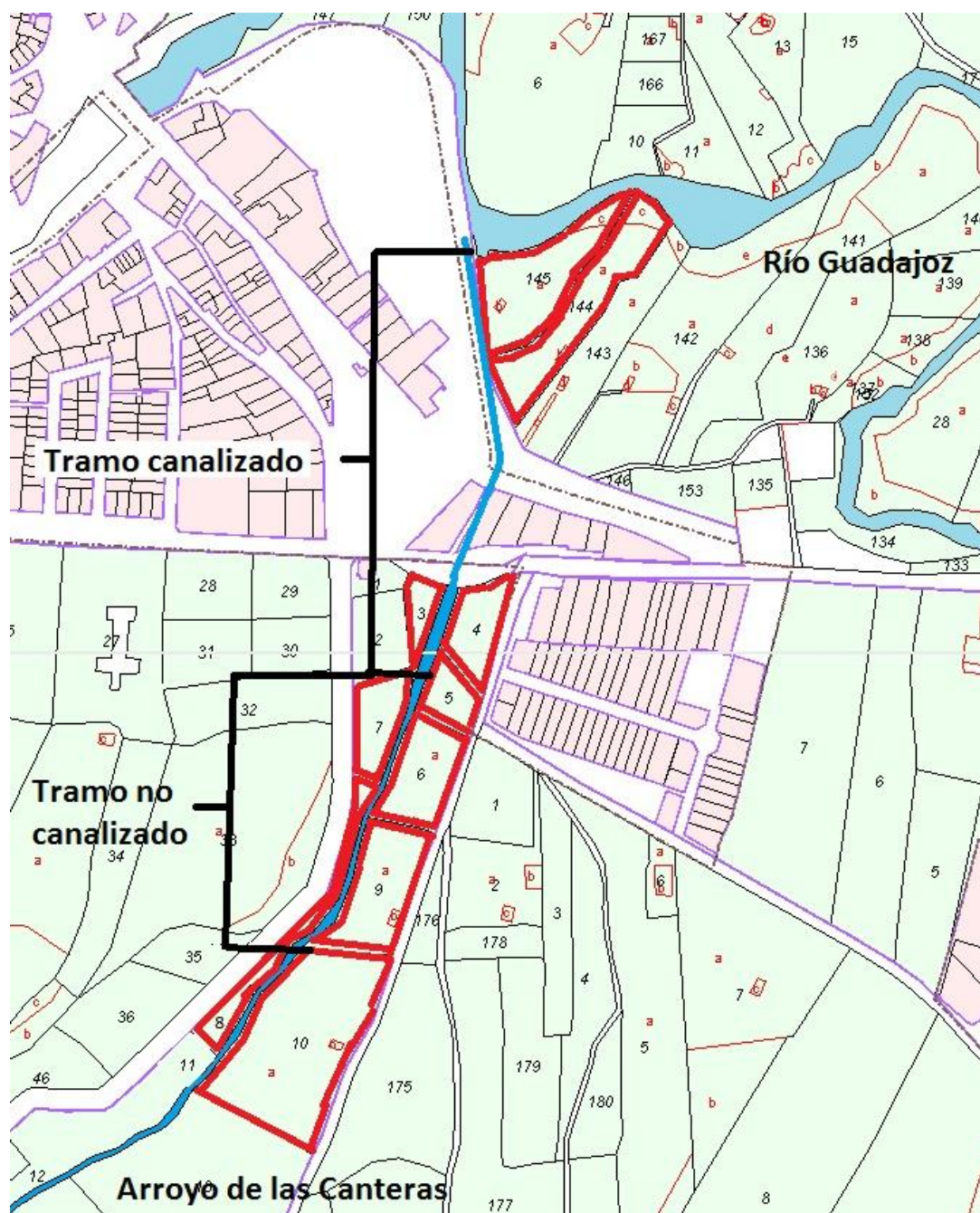


Fig. 41: Mapa catastral de la zona de actuación. (Obtenido de Sede Electrónica del Catastro)

Las parcelas colindantes con la actuación y que pueden verse afectadas son las siguientes: 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 144 y 145. Todas ellas son privadas.

En las siguientes imágenes se muestran los datos catastrales obtenidos de la sede electrónica del Catastro donde vienen indicados el tipo de finca, tipo de uso, clase de cultivo, superficie e intensidad productiva de cada subparcela, etc.



Datos catastrales de la parcela 3:

Referencia catastral 14019A021000030000HX

Localización Polígono 21 Parcela 3
TIERRAS CALMAS. CASTRO DEL RIO (CÓRDOBA)

Clase Rústico

Coefficiente de participación 100,000000 %

Uso Agrario

Datos de la Finca en la que se integra el Bien Inmueble



Localización Polígono 21 Parcela 3
TIERRAS CALMAS. CASTRO DEL RIO (CÓRDOBA)

Superficie suelo 2.352 m²

Cultivos	Subparcelas	Clase de Cultivo	Superficie (Ha)	Intensidad Productiva
	0	C- Labor o Labradío seco	0,2352	01

Datos catastrales de la parcela 4:

Referencia catastral 14019A021000040000HI

Localización Polígono 21 Parcela 4
TIERRAS CALMAS. CASTRO DEL RIO (CÓRDOBA)

Clase Rústico

Coefficiente de participación 100,000000 %

Uso Agrario

Datos de la Finca en la que se integra el Bien Inmueble



Localización Polígono 21 Parcela 4
TIERRAS CALMAS. CASTRO DEL RIO (CÓRDOBA)

Superficie suelo 4.840 m²

Cultivos	Subparcelas	Clase de Cultivo	Superficie (Ha)	Intensidad Productiva
	0	C- Labor o Labradío seco	0,4840	01

Datos catastrales de la parcela 5:

Referencia catastral 14019A021000050000HJ


Localización Polígono 21 Parcela 5
TIERRAS CALMAS. CASTRO DEL RIO (CÓRDOBA)

Clase Rústico

Coefficiente de participación 100,000000 %

Uso Agrario

Datos de la Finca en la que se integra el Bien Inmueble



Localización Polígono 21 Parcela 5
TIERRAS CALMAS. CASTRO DEL RIO (CÓRDOBA)

Superficie suelo 3.194 m²

Cultivos	Subparcelas	Clase de Cultivo	Superficie (Ha)	Intensidad Productiva
	0	C- Labor o Labradío seco	0,3194	01



Datos catastrales de la parcela 6:

Referencia catastral 14019A021000060000HE

Localización Polígono 21 Parcela 6
CANTERAS LAS. CASTRO DEL RIO (CÓRDOBA)

Clase Rústico

Coefficiente de participación 100,000000 %

Uso Agrario

Datos de la Finca en la que se integra el Bien Inmueble



Localización Polígono 21 Parcela 6
CANTERAS LAS. CASTRO DEL RIO (CÓRDOBA)

Superficie construida 0 m²

Superficie suelo 6.780 m²

Cultivos

Subparcelas	Clase de Cultivo	Superficie (Ha)	Intensidad Productiva
a	C- Labor o Labradío secoano	0,6633	03
b	I- Improductivo	0,0147	00

Datos catastrales de la parcela 7:

Referencia catastral 14019A021000070000HS

Localización Polígono 21 Parcela 7
CANTERAS LAS. CASTRO DEL RIO (CÓRDOBA)

Clase Rústico

Coefficiente de participación 100,000000 %

Uso Agrario

Datos de la Finca en la que se integra el Bien Inmueble



Localización Polígono 21 Parcela 7
CANTERAS LAS. CASTRO DEL RIO (CÓRDOBA)

Superficie suelo 4.727 m²

Cultivos

Subparcelas	Clase de Cultivo	Superficie (Ha)	Intensidad Productiva
0	C- Labor o Labradío secoano	0,4727	03

Datos catastrales de la parcela 8:

Referencia catastral 14019A021000080000HZ

Localización Polígono 21 Parcela 8
CANTERAS LAS. CASTRO DEL RIO (CÓRDOBA)

Clase Rústico

Coefficiente de participación 100,000000 %

Uso Agrario

Datos de la Finca en la que se integra el Bien Inmueble



Localización Polígono 21 Parcela 8
CANTERAS LAS. CASTRO DEL RIO (CÓRDOBA)

Superficie suelo 5.425 m²

Cultivos

Subparcelas	Clase de Cultivo	Superficie (Ha)	Intensidad Productiva
0	O- Olivos secoano	0,5425	02



Datos catastrales de la parcela 9:

Referencia catastral 14019A021000090000HU

Localización Polígono 21 Parcela 9
CANTERAS LAS. CASTRO DEL RIO (CÓRDOBA)

Clase Rústico

Coficiente de participación 100,000000 %

Uso Agrario

Datos de la Finca en la que se integra el Bien Inmueble



Localización Polígono 21 Parcela 9
CANTERAS LAS. CASTRO DEL RIO (CÓRDOBA)

Superficie suelo 9,042 m²

Subparcelas	Clase de Cultivo	Superficie (Ha)	Intensidad Productiva
a	C- Labor o Labradío seco	0,8912	03
b	I- Improductivo	0,0130	00

Datos catastrales de la parcela 10:

Referencia catastral 14019A021000100000HS

Localización Polígono 21 Parcela 10
CANTERAS LAS. CASTRO DEL RIO (CÓRDOBA)

Clase Rústico

Coficiente de participación 100,000000 %

Uso Agrario

Datos de la Finca en la que se integra el Bien Inmueble



Localización Polígono 21 Parcela 10
CANTERAS LAS. CASTRO DEL RIO (CÓRDOBA)

Superficie suelo 20,473 m²

Subparcelas	Clase de Cultivo	Superficie (Ha)	Intensidad Productiva
a	O- Olivos seco	2,0388	02
b	I- Improductivo	0,0085	00

Datos catastrales de la parcela 144:

Referencia catastral 14019A035001440000HG

Localización Polígono 35 Parcela 144
MOLINOS LOS. CASTRO DEL RIO (CÓRDOBA)

Clase Rústico

Coficiente de participación 100,000000 %

Uso Agrario

Datos de la Finca en la que se integra el Bien Inmueble



Localización Polígono 35 Parcela 144
MOLINOS LOS. CASTRO DEL RIO (CÓRDOBA)

Superficie suelo 10,983 m²

Subparcelas	Clase de Cultivo	Superficie (Ha)	Intensidad Productiva
a	HR Huerta regadío	0,9632	01
b	I- Improductivo	0,0083	00
c	RI Arboles de ribera	0,1268	00



Datos catastrales de la parcela 145:

Referencia catastral 14019A035001450000HQ			
Localización Polígono 35 Parcela 145 MOLINOS LOS. CASTRO DEL RÍO (CÓRDOBA)			
Clase Rústico			
Coeficiente de participación 100,000000 %			
Uso Agrario			
<p>Datos de la Finca en la que se integra el Bien Inmueble</p> 			
Localización Polígono 35 Parcela 145 MOLINOS LOS. CASTRO DEL RÍO (CÓRDOBA)			
Superficie suelo 10.806 m ²			
Cultivos			
Subparcelas	Clase de Cultivo	Superficie (Ha)	Intensidad Productiva
a	HR Huerta regadío	0,9468	01
b	I- Improductivo	0,0087	00
c	RI Árboles de ribera	0,1251	00

5.2. MEDIO NATURAL

Con respecto al medio natural del tramo, poco se puede decir, ya que al atravesar una zona urbana y estar canalizado, se ha desprovisto totalmente de naturalidad.

Sin embargo, se puede hablar de los elementos existentes en el mismo arroyo, aguas arriba del tramo.

5.2.1. VEGETACIÓN DE RIBERA

Como vegetación de ribera existente aguas arriba del canal, se pueden encontrar diversa vegetación herbácea ruderal además de carrizos (*Phragmites australis* Cav.), enneas (*Typha dominguensis* Pers.) y tarays (*Tamarix canariensis* Willd.).

5.2.2. FAUNA

Ya que es un arroyo temporal que solo lleva agua cuando existen precipitaciones suficientes, en determinadas épocas del año, no existen comunidades piscícolas, sin embargo se pueden encontrar anfibios como la rana común (*Rana perezi*) y el galápago (*Mauremys leprosa*).

Sin embargo, en el Río Guadajoz, en el cual desemboca el arroyo, se puede encontrar boga (*Pseudohondrostoma willkommii*), barbo gitano (*Luciobarbus sclateri*), calandino (*Squalius alburnoides*) y trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*).

ANEJO N° 2

ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO

ÍNDICE

1. ESTUDIO HIDROLÓGICO	6
1.1. Objeto.....	6
1.2. Bases de la Normativa de aplicación	6
1.3. Bases de cálculo	6
1.3.1. Características de la cuenca	6
1.3.2. Periodo de retorno.....	7
1.3.3. Precipitación de de cálculo.....	7
1.4. Cálculos.....	8
1.4.1. Tiempo de concentración (T_c)	8
1.4.2. Coeficiente de variación(C)	9
1.4.3. Cálculo de la Intensidad de precipitación (I_t)	14
1.4.4. Cálculo del caudal de máxima avenida (Q)	15
2. CAUDALES ASOCIADOS A OTROS PERIODOS DE RETORNO:	16
2.1. Caudal asociado a un periodo de retorno de 200 años:	16
2.1.1. Cálculo de C mediante el Método Racional.	17
2.1.2. Cálculo de la Intensidad de precipitación (I_t)	18
2.1.3. Variables y cálculo del caudal	18
2.2. Caudal asociado a un periodo de retorno de 100 años:	19
2.2.1. Cálculo de C mediante el Método Racional.	19
2.2.2. Cálculo de la Intensidad de precipitación (I_t)	20
2.2.3. Variables y cálculo del caudal	20
2.3. Caudal asociado a un periodo de retorno de 50 años:	21
2.3.1. Cálculo de C mediante el Método Racional.	21
2.3.2. Cálculo de la Intensidad de precipitación (I_t)	22
2.3.3. Variables y cálculo del caudal	22
2.4. PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 20 AÑOS:	23
2.4.1. Cálculo de C mediante el Método Racional.....	23

2.4.2.	<i>Cálculo de la Intensidad de precipitación (I_t)</i>	24
2.4.3.	<i>Variables y cálculo del caudal</i>	24
2.5.	<i>Resumen cálculo caudales</i>	25
3.	ESTUDIO HIDRÁULICO	26
3.1.	<i>Datos de partida</i>	26
3.1.1.	<i>Vegetación</i>	27
3.1.2.	<i>Coefficientes de rozamiento</i>	28
3.2.	METODOLOGÍA	31
3.2.1.	<i>Secciones modelizadas</i>	31
3.2.2.	<i>Bases de cálculo</i>	37
3.2.3.	<i>Condiciones de contorno</i>	39
4.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	39
4.1.	<i>Perfil longitudinal</i>	40
4.2.	<i>Gráfico de velocidades</i>	41
4.3.	<i>Gráfico del número de froude</i>	42
4.4.	<i>Tabla resumen de los resultados</i>	43
5.	ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD	45
6.	CONCLUSIONES	56
7.	PLANOS	59
8.	DATOS TAQUIMÉTRICOS DEL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1: Polígonos de P_0 , combinación de usos del suelo y geología del suelo de la cuenca del arroyo de las Canteras mediante ArcGIS.	10
Fig. 2: Mapa del coeficiente corrector del umbral de escorrentía	13
Fig. 3: Mapa de isolíneas II/Id	14
Fig. 4: Vegetación natural del arroyo de las Canteras.	27
Fig. 5: Vegetación natural del arroyo de las Canteras.	28
Fig. 6: Vegetación existente en los márgenes del canal.	29
Fig. 7: Planta de perfiles.	32
Fig. 8: Tramo naturalizado anterior al canal.	33
Fig. 9: Primer tramo del canal y primer puente al fondo.	34
Fig. 10: Recta del canal visualizada desde el primer puente y curva al fondo.	34
Fig. 11: Zona del canal posterior a la curva visualizada desde el segundo puente.	35
Fig. 12: Último tramo de canal trapezoidal y paso a la parte rectangular.	35
Fig. 13: Tramo final del canal visualizado desde el tercer y último puente.	36
Fig. 14: Salto de la desembocadura del canal.	36
Fig. 15: Modelo de cálculo.....	37
Fig. 16: Perfil longitudinal.	40
Fig. 17: Perfil longitudinal del tramo de actuación.	40
Fig. 18: Gráfico de velocidades para el tramo de estudio.	41
Fig. 19: Gráfico del número de Froude.	43
Fig. 20: Perfil longitudinal del tramo de actuación.	46
Fig. 21: Perfiles del tramo de estudio con el caudal T500 modelizado.	53
Fig. 22: Zona de desbordamiento producido con el caudal T500.	54
Fig. 23: Detalle de la zona de la curva.	55
Fig. 24: Gráfico de velocidades para el tramo de estudio.	58
Fig. 25: Gráfico del número de Froude.	58
Fig. 26: Perfil longitudinal del tramo de actuación con cota de lámina de agua.	58

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Clasificación de suelos a efectos del umbral de escorrentía</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 2: Ponderación de P0 para la Cuenca.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 3: Recopilación de valores de n de Manning, Obtenido de “Open-Channel Hydraulics”</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 4: Velocidad máxima permitida en cauces para que no se produzca erosión.</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 5: Resultados numéricos de la modelización.</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 6: Resultados de la modelización según zonificación.</i>	<i>57</i>

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1: Tiempo de concentración</i>	<i>8</i>
<i>Ecuación 2: Umbral de esorrentía.....</i>	<i>12</i>
<i>Ecuación 3: Intensidad media horaria de precipitación.....</i>	<i>14</i>
<i>Ecuación 4: Coeficiente reductor por área.....</i>	<i>15</i>
<i>Ecuación 5: Caudal de máxima avenida</i>	<i>15</i>
<i>Ecuación 6: Coeficiente de corrección de Témez.....</i>	<i>15</i>
<i>Ecuación 7: Energía total de la sección de un canal.....</i>	<i>37</i>
<i>Ecuación 8: Pérdida de energía entre dos secciones transversales</i>	<i>38</i>
<i>Ecuación 9: Conducción por subdivisión</i>	<i>38</i>
<i>Ecuación 10: Coeficiente de velocidad.....</i>	<i>38</i>
<i>Ecuación 11: Pendiente de fricción representativa.....</i>	<i>38</i>
<i>Ecuación 12: Número de froude.....</i>	<i>42</i>
<i>Ecuación 13: Incremento de la cota de lámina de agua en una curva</i>	<i>55</i>



1. ESTUDIO HIDROLÓGICO

1.1. OBJETO

El objeto del estudio hidrológico es el cálculo de los caudales circulantes para las avenidas asociadas a los periodos de retorno de 20, 50, 100, 200 y 500 años para el tramo canalizado del Arroyo de las Canteras en Castro del Río, en la provincia de Córdoba.

A partir de los datos obtenidos en este documento, en el anejo 4 de “Propuesta de soluciones técnicas y justificación” se determinará si la sección del canal actual es suficiente y cuál debe ser el nuevo trazado necesario para que no se produzcan desbordamientos ni grandes erosiones.

Identificadas las zonas de conflicto, se diseñarán las mejoras de las secciones y la restauración del cauce para recuperar éste y preservar el mismo de la erosión hídrica, analizando localmente el comportamiento del tramo de estudio del arroyo antes y después de la restauración para la avenida de cálculo asociada al periodo de retorno de 500 años.

1.2. BASES DE LA NORMATIVA DE APLICACIÓN

Como premisas previas se citan las isolíneas, en nuestro caso de precipitaciones máximas en 24h, publicados por la Dirección General de Carreteras en el texto “Máximas Precipitaciones de la España Peninsular” (1997) y el período de retorno a considerar.

Se han estudiado varios períodos de retorno para observar el comportamiento de la nueva sección con distintos caudales. Hay que tener en cuenta el criterio que establecen los Organismos competentes en materia hidrológica para establecer el periodo de retorno adecuado para adaptar la actuación, en este caso la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

En cuanto a normativa, es de aplicación la Instrucción 5.2.IC, Orden de 14 de Mayo de 1.990 del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.

1.3. BASES DE CÁLCULO

1.3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA

Para calcular el caudal circulante asociado a una tormenta determinada para un periodo de retorno de 500 años, se necesitan los siguientes datos, ya que el valor del caudal depende fuertemente de las características de la cuenca.



Los valores de las características necesarias de la cuenca del arroyo de las Canteras son:

- Área de la cuenca: 8.84 km²
- Longitud del cauce: 5.63 km
- Desnivel máximo: 504 – 225 = 279 m
- Coordenadas del centroide de la cuenca: X:368942; Y: 4169329 (*Datum ETRS89*)

1.3.2. PERIODO DE RETORNO

En el estudio de avenidas, se ha de definir el máximo período de retorno a considerar. Los valores que adoptan los diferentes autores varían según el tipo de cuenca y los daños previsibles, debiendo, además, tenerse en cuenta el criterio que establecen los organismos competentes en materia hidrológica.

En el caso de cuencas mayores, con cauces ya conformados como es nuestro caso, los períodos de retorno se establecen entre 50 y 100 años.

Teniendo en cuenta la normativa de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, se adopta para este caso el valor límite de 500 años ya que la parte final del canal se encuentra cerca del núcleo urbano y puede suponer un riesgo para la población y las viviendas. No obstante, se desarrollarán los cálculos para los periodos de retorno 20, 50, 100, 200 y 500 años.

Para la protección del DPH, se ha empleado el periodo de retorno 50 años, esta hipótesis es conservadora, ya que la crecida máxima ordinaria se suele correlacionar con periodos de retorno comprendidos entre 2 y 5 años.

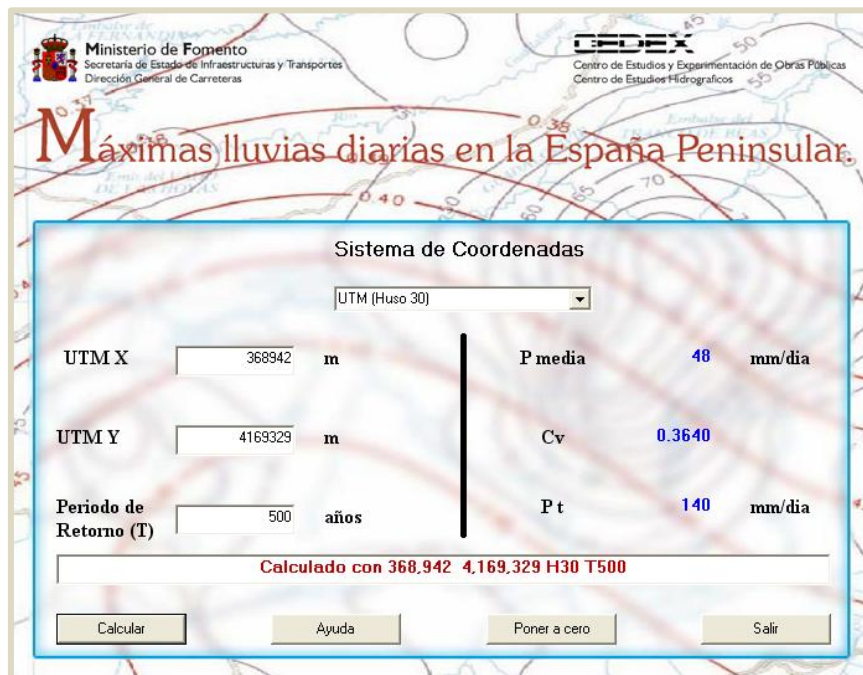
1.3.3. PRECIPITACIÓN DE CÁLCULO

Para la determinación de la precipitación de cálculo se ha utilizado el software Maxpluwin, versión 1.0, que aporta la precipitación máxima diaria para un periodo de retorno determinado en un lugar concreto. Dicho software está basado en la publicación del Ministerio de Fomento “Máximas lluvias diarias en la España Peninsular”, de la Dirección General de Carreteras.

La coordenada a insertar para obtener el valor de la lluvia es la correspondiente al centroide de la cuenca del arroyo de las Canteras y el periodo de retorno utilizado es el de 500 años.

Mediante dicho valor de la lluvia, se procede a estimar la Intensidad Horaria, que junto con la Superficie de las Cuencas Vertientes y el Coeficiente de Escorrentía determinará los caudales a considerar en base al período de retorno considerado.

Resultado de Maxpluwin introduciendo las coordenadas de la cuenca del arroyo de las Canteras y el periodo de retorno de 500 años:



**P media:* Valor medio de la máxima precipitación diaria:

**Cv :* coeficiente de escorrentía

**Pt :* Precipitación máxima diaria

Los resultados son los siguientes:

- Valor medio de la precipitación media diaria = 48 mm/día
- Coeficiente de escorrentía = 0,3640 (adimensional)
- Precipitación máxima diaria = 140 mm/día

Una vez obtenido el valor de la precipitación media, se calcula el tiempo de concentración de la cuenca para saber si el método racional modificado para la obtención del caudal es apto.

1.4. CÁLCULOS

1.4.1. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (T_c)

El tiempo de concentración es el tiempo que tarda la gota que cae dentro de la cuenca en el punto más alejado al punto de cierre de la misma. La fórmula es la siguiente:

Ecuación 1

$$T_c = 0,3 \cdot \left[\frac{L}{J^{0,25}} \right]^{0,76}$$

**L:* longitud del cauce principal (km).

**J:* pendiente media del cauce (m/m).



Para el arroyo de las Canteras:

- Longitud: 5,63 km
- Pendiente: 0,050 m/m

$$Tc = 0,3 \cdot \left[\frac{1,09}{0,06^{0,25}} \right]^{0,76} = 1,974 \text{ h}$$

Se obtiene un tiempo de concentración de 1,974 horas, por lo que al ser menor de 6 horas se considera una cuenca apta para la aplicación del método racional modificado para la obtención del caudal.

Se calculará el caudal máximo asociado a un periodo de retorno de 500 años.

1.4.2. COEFICIENTE DE VARIACIÓN (C)

CÁLCULO DE C MEDIANTE EL MÉTODO RACIONAL.

El coeficiente de variación es la relación que existe entre la escorrentía que se produce en la cuenca y la precipitación máxima diaria para el periodo de retorno seleccionado o para la precipitación producida en un determinado aguacero.

El coeficiente de escorrentía que utiliza el modelo de infiltración del S.C.S depende tanto del parámetro del modelo de infiltración, como de la magnitud del aguacero:

Ecuación 2

$$C = \frac{\left(\frac{Pd}{P_0} - 1 \right) \cdot \left(\frac{P_d}{P_0} + 23 \right)}{\left(\frac{Pd}{P_0} + 11 \right)}$$

**P_d: máxima precipitación diaria para el período seleccionado (mm/día)*

**P₀: umbral de escorrentía (mm)*

P_d = 131,17 mm/día. (Obtenido anteriormente con Maxpluwin)

Se procede a calcular el umbral de escorrentía para resolver la fórmula.

DETERMINACIÓN DEL UMBRAL DE ESCORRENTÍA (P₀)

El umbral de escorrentía (P₀) se obtiene a partir de unos valores iniciales obtenidos de la tabla 2-1 de la Instrucción 5.2 I.C. Además, este umbral de escorrentía debe corregirse mediante un coeficiente que tiene en cuenta la humedad antecedente y otras correcciones experimentales.

Para calcular el valor de P₀ de la cuenca, se divide la cuenca en superficies homogéneas.



Observando el mapa de geológico de España (Magna50) y el de usos del suelo (SIOSE) para conseguir un mapa combinado en el que resulten distintos polígonos que definan el tipo de cobertura y el tipo de suelo conjuntamente.

El tipo de geología del suelo (para mayor detalle ver *anejo nº1 "Caracterización de la zona de estudio"*) de la cuenca del arroyo de las Canteras está constituido en su totalidad por margas blancas arenosas, este tipo de suelo pertenece a un grupo hidrológico B, correspondiente a una capacidad de infiltración moderada. (Ver fig.6.)

Combinando la geología y el mapa de usos del suelo resulta el siguiente mapa de valores de P_0 :

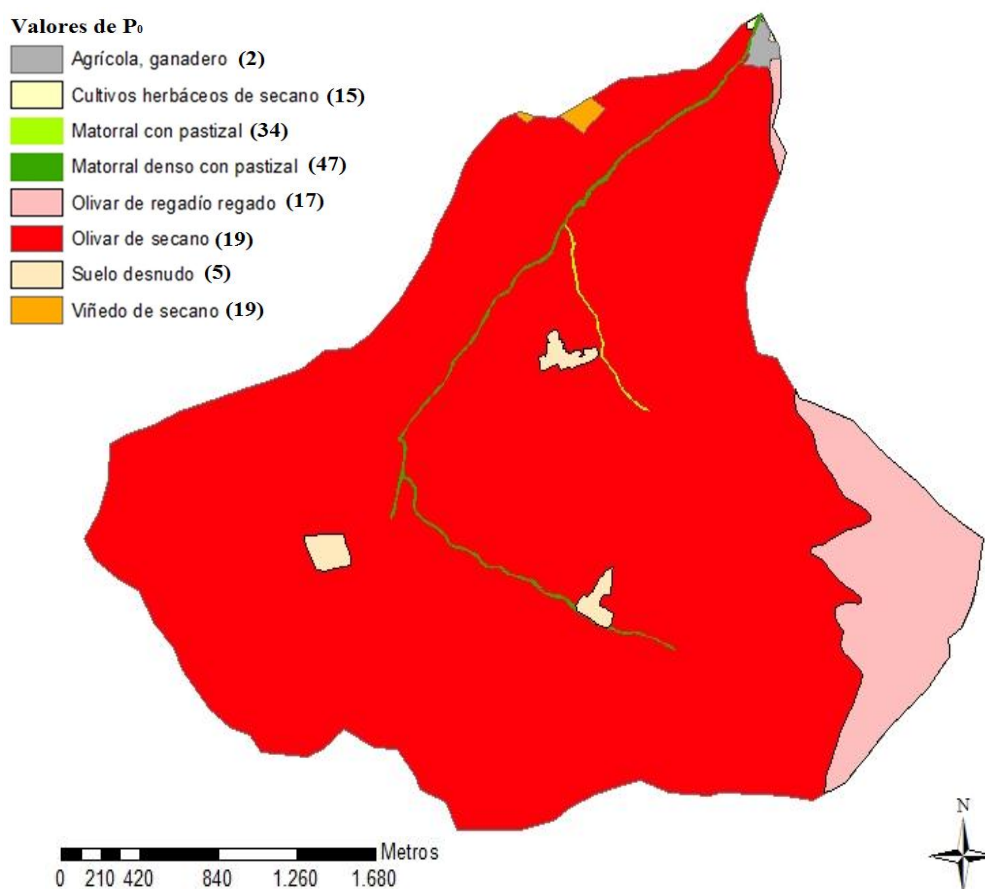


Fig. 1: Polígonos de P_0 , combinación de usos del suelo y geología del suelo de la cuenca del arroyo de las Canteras mediante ArcGIS. (Elaboración propia).

Una vez definidos los distintos polígonos, se asigna un valor relacionado con la escorrentía a cada uno utilizando las tablas 1 y 2.



Tabla 1: Clasificación de suelos a efectos del umbral de escorrentía (Obtenido de la Instrucción 5.2 de Drenaje Superficial de la MOPU).

Grupo	Potencia	Textura	Drenaje
Rápida	Grande	Arenosa Areno-limosa	Perfecto
		Franco-arenosa	
		Franca	
Moderada	Media-grande	Franco-arcillosa	Bueno a moderado
		Arenosa	
		Franco-limosa	
		Franco-arcillosa	
Lenta	Media-pequeña	Franco-arcillo-limosa	Imperfecto
		Arcillo-arenosa	
Muy lenta	Pequeña	Arcillosa	Pobre o muy pobre

Uso del suelo	Pendiente (%)	Característica hidrológica	Grupo de suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	≥ 3	R	15	8	6	4
		N	17	11	8	6
		R/N	20	14	11	8
Cereales en hilera	≥ 3	R	23	13	8	6
		N	25	16	11	8
		R/N	28	19	14	11
Cereales de invierno	≥ 3	R	29	17	10	8
		N	32	19	12	10
		R/N	34	21	14	12
Rotación de cultivos pobres	≥ 3	R	26	15	9	6
		N	28	17	11	8
		R/N	30	19	13	10
Rotación de cultivos densos	≥ 3	R	37	20	12	9
		N	42	23	14	11
		R/N	47	25	16	13
Praderas	≥ 3	Pobre	24	14	8	6
		Media	53	23	14	9
		Buena	0	33	18	13
		Muy buena	0	41	22	15
		Pobre	58	25	12	7
	< 3	Media	0	35	17	10
		Buena	0	0	22	14
		Muy buena	0	0	25	16
		Pobre	82	26	15	10
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	≥ 3	Media	0	34	19	14
		Buena	0	42	22	15



Masas forestales (bosques, monte bajo, etc.)	<3	Pobre	0	34	19	14
		Media	0	42	22	15
		Buena	0	50	25	16
		Muy clara	40	17	8	5
		Clara	80	24	14	10
		Media	0	34	22	16
		Espesa	0	47	31	23
		Muy espesa	0	65	43	33

Uso del suelo		Pendiente	Valor
Suelo desnudo	Rocas permeables	≥ 3	3
		<3	5
	Rocas impermeables	≥ 3	2
		<3	4
Firmes	Firmes granulares sin pavimento		2
	Adoquinados		1,5
	Pavimentos bituminosos o de hormigón		1

Ponderando cada valor asignado con el área de cada polígono se obtiene la siguiente tabla (se da por hecho que todos los usos del suelo se dan sobre margas blancas arenosas):

Tabla 2: Ponderación de P0 para la Cuenca. (Elaboración propia)

Uso del suelo	Área (m2)	Valor para P0	Área*Valor para P0
Agrícola - ganadero	20856.69	2	41713.38
Cultivos herbáceos de secano	2450.78	15	36761.7
Matorral con pastizal	5494.47	34	186811.98
Matorral denso con pastizal	32152.72	47	1511177.84
Olivar de regadío regado	721627.96	17	12267675.32
Olivar de secano	7964907.64	19	151333245.2
Suelo desnudo	78142.02	5	390710.1
Viñedo de secano	19018.61	19	361353.59
	8844650.89		Total: 166129449.1

Utilizando los datos obtenidos y a partir de las tablas anteriormente expuestas, se calcula el umbral de escorrentía P_0 (mm).

Ecuación 2

$$\sum \text{área}_i \cdot \text{Valor para } P_0 / \text{área cuenca} = \text{Umbral de escorrentía } (P_0)$$

Sustituyendo los valores en la fórmula anterior se obtiene una estimación inicial para el umbral de escorrentía P_0 igual a **18,78mm**.

Al valor obtenido para el umbral de escorrentía se le debe aplicar un coeficiente corrector que tiene en cuenta la humedad antecedente y otras correcciones experimentales según la región.

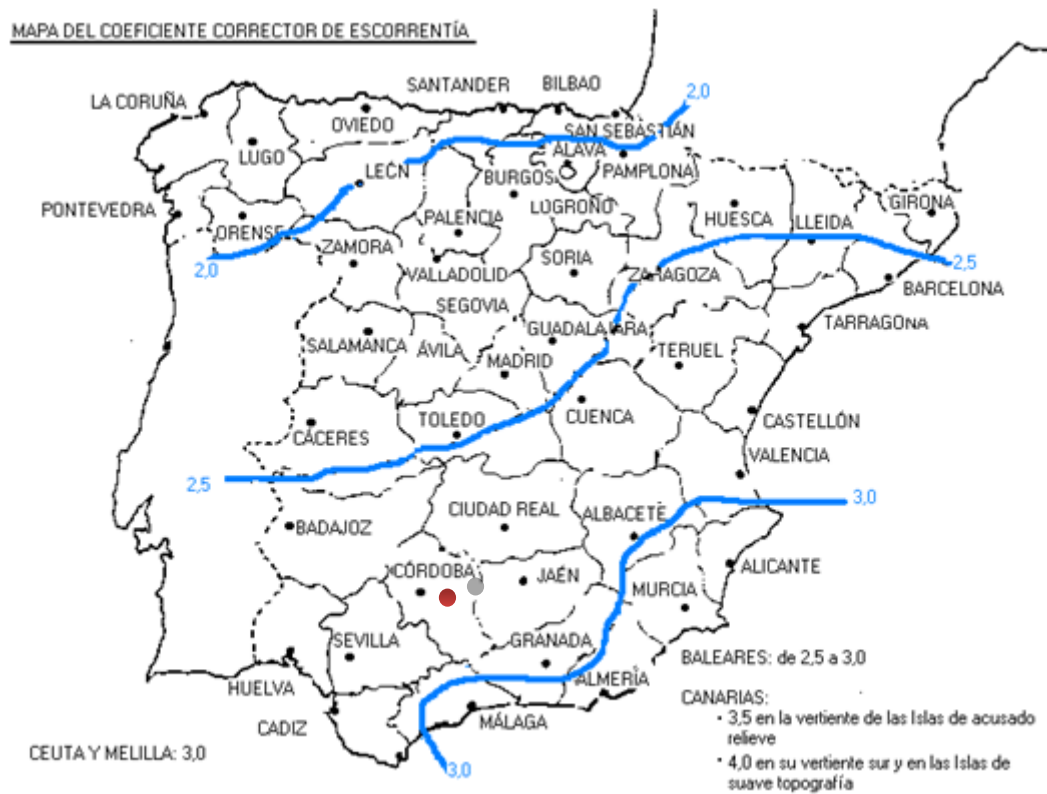


Fig. 2: Mapa del coeficiente corrector del umbral de escorrentía (Obtenido de la Instrucción 5.2 de Drenaje Superficial de la MOPU).

Según la localización de la cuenca del arroyo de las Canteras se aplicará un coeficiente de corrección de 2,8. Resulta un umbral de escorrentía para la cuenca con un valor final de:

$$P_0 = 18,78 \cdot 2,8 = 52,584 \text{ mm} \rightarrow 25 \text{ mm}$$

*No se admiten valores superiores a 25mm para la realización de estudios hidrológicos en Andalucía, por lo que se utilizará dicho valor máximo para la obtención del coeficiente de variación.

Una vez obtenidos estos datos, se procede al cálculo del coeficiente de escorrentía sustituyendo los valores en la ecuación 2.

$$C = \frac{\left(\frac{P_d}{P_0} - 1\right) \cdot \left(\frac{P_d}{P_0} + 23\right)}{\left(\frac{P_d}{P_0} + 11\right)^2} = 0,454$$

* $P_d = P_t K_a$: Precipitación máxima diaria corregida (131,17 mm/día)

* K_a : Coeficiente reductor por área (0,94)

* P_t : Precipitación máxima diaria (140 mm/día)

* P_0 : Umbral de escorrentía (25mm)

1.4.3. CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN (I_T)

Para el cálculo de las precipitaciones máximas para distintas duraciones de aguacero se parte de la precipitación máxima diaria.

Dicho valor también se puede obtener automáticamente mediante la aplicación informática MAXIM, está desarrollada a partir de un sistema de información geográfica. MAXIM se apoya en los recientes estudios desarrollados por de Salas (2005) para la actualización y adecuación de las leyes Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) en la España peninsular, y permite, mediante un mapa interactivo, calcular la intensidad máxima para cada duración y período de retorno en cualquier punto de la España peninsular.

En este caso, para dicho cálculo se parte de la formulación expuesta en la Instrucción 5.2-I.C de Drenaje Superficial, que tiene la siguiente expresión:

$$I_t = I_d \cdot \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{\frac{28^{0,1} - t^{0,1}}{28^{0,1} - 1}}$$

Ecuación 3

** I_t : intensidad media horaria de precipitación (mm/h)*

** $I_d = P_d/24$ (mm/h)*

** P_d : precipitación total diaria corregida correspondiente al período de retorno considerado (mm/día)*

** I_1 : intensidad horaria de precipitación (mm/h)*

** $t = T_c$: duración del intervalo al que se refiere $I(h)$*

Para calcular I_1/I_d se utilizará el siguiente mapa:



Fig. 3: Mapa de isolíneas I_1/I_d . (Obtenido de la Instrucción 5.2-IC de Drenaje Superficial de la MOPU).



- La zona de estudio tiene un valor de $I_1/I_d = 8,5$ (adimensional)
- El tiempo de concentración calculado anteriormente es: $t = 1,974$ horas

Finalmente necesitamos la I_d , que dividiendo la P_d obtenida con MaxPluwin corregida entre 24 horas obtenemos un valor de:

$$I_d = P_d (\text{mm/día}) / 24 (\text{horas}) = 131,17/24 = 5,47 \text{ mm/h.}$$

Si el área de la cuenca $> 1 \text{ km}^2$, al valor de la intensidad se le aplica el coeficiente reductor por área (K_a).

Ecuación 4

$$K_a = 1 - \log\left(\frac{A}{15}\right)$$

**A: Superficie de la cuenca (km^2)*

La K_a para la zona de Castro del Río tiene un valor de 0,94.

Introduciendo estos datos en la fórmula de la I_t , obtenemos una intensidad de precipitación para un periodo de retorno de 500 años igual a: **31,738 mm/h**

1.4.4. CÁLCULO DEL CAUDAL DE MÁXIMA AVENIDA (Q)

Ya obtenidos todos los datos necesarios, se calculará el caudal de máxima avenida asociada a un periodo de retorno de 500 años. La fórmula es la siguiente:

Ecuación 5

$$Q_{T500} = \frac{I \cdot A \cdot C}{3,6} \cdot K'$$

**Q: Caudal punta correspondiente Al período de retorno de 500 años (m^3/s)*
**I: Máxima intensidad media en el intervalo de duración t_c para el mismo período de retorno (mm/h)*
**A: Superficie de la cuenca (km^2)*
**C: Coeficiente de escorrentía (adimensional)*
**K': Coeficiente de corrección de Témez aplicado a Q*

El valor del K' depende del tiempo de concentración y la fórmula es la siguiente:

Ecuación 6

$$K' = 1 + \frac{T_c^{1,25}}{T_c^{1,25} + 14}$$

El tiempo de concentración (T_c) obtenido anteriormente tiene un valor de 1,974 que, sustituyéndolo en la fórmula, resulta un valor K' con valor de 1,1432.

Los valores obtenidos han sido:



- $I = 31,378 \text{ mm/h}$
- $A = 8,84 \text{ km}^2$
- $C = 0,454$ (adimensional) $\rightarrow 0,6^*$
- $K' = 1,1432$ (adimensional)

*Al no admitirse valores para el coeficiente de escorrentía menores a 0,6 según las recomendaciones de la Diputación Provincial de Córdoba, se tomará como 0,6 el valor de C.

Sustituyendo en la fórmula se obtiene un Caudal de máxima avenida asociado a un periodo de retorno de 500 años de:

$$Q_{T500} = 53,46 \text{ m}^3/\text{s}$$

Características físicas de la cuenca A: Área de la cuenca (Km ²) = 8.84 L: Longitud del cauce (Km) = 5.63 H: Desnivel (Km) = 0.279 J: Pendiente (m/m) = 0.050		Caudal por el Metodo Racional Modificado $Q = \frac{C * I * A * K'}{3.6}$	
Datos según el periodo de retorno considerado: T500 Pd: Precipitación total diaria para T500 = 140.00 mm Ka: Coeficiente reductor por área = 0.94 Id: Intensidad media diaria para T500 = 5.47 mm/h Gráfica I1/Id (s/mapa: Córdoba entre 9 y 8) = 8.5 It: Intensidad media para T500 = 31.738 mm/h Po: Umbral de escorrentía (s/tabla) = 18.78 mm Coef. corrector (s/mapa: Córdoba entre 2,5 y 3) = 2.8 C: Coeficiente de escorrentía = 0.209		Ka: Coeficiente reductor por área aplicado a Pd: $A < 1 \text{ Km}^2 \Rightarrow K_A = 1$ $1 \leq A < 3.000 \text{ Km}^2 \Rightarrow K_A = 1 - \frac{\log_{10} A}{15}$	
Aplicando las recomendaciones de la D.P. de Córdoba de la AAA: No se admitirán valores de Po* > 25 \Rightarrow Po* adoptado = 25 \Rightarrow coeficiente de escorrentía = 0.454 No se admitirán valores de C < 0,6 \Rightarrow C adoptado = 0.6		K': Coeficiente de corrección de Témez aplicado a Q: $K' = 1 + \frac{Tc^{1.25}}{Tc^{1.25} + 14}$ K' = 1.1432 SIN recomendaciones AAA Q= 18.64 m3/seg CON recomendaciones AAA Q= 53.46 m3/seg	

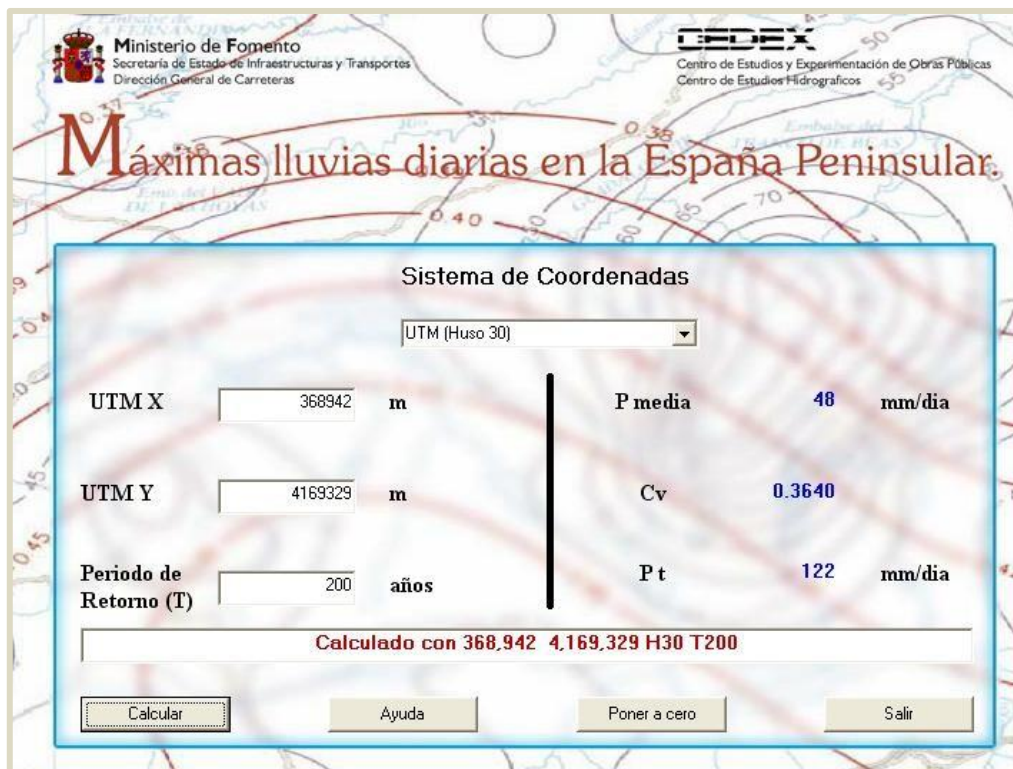
2. CAUDALES ASOCIADOS A OTROS PERIODOS DE RETORNO:

Para calcular el caudal se necesitan los parámetros anteriores. A y K' son constantes para todos los periodos de retorno porque únicamente dependen de las características de la cuenca y ya están calculados, sin embargo, la máxima intensidad media en el intervalo de duración $t_c(I)$ y el coeficiente de escorrentía hay que volver a obtenerlos.

- $A = 8,84 \text{ km}^2$
- Coeficiente de corrección de Témez (K') = 1,1432 (adimensional)

2.1. CAUDAL ASOCIADO A UN PERIODO DE RETORNO DE 200 AÑOS:

$$Q_{T200} = (I.A.C / 3,6) \cdot K'$$



2.1.1. CÁLCULO DE C MEDIANTE EL MÉTODO RACIONAL.

$$C = \frac{\left(\frac{P_d}{P_0} - 1\right) \cdot \left(\frac{P_d}{P_0} + 23\right)}{\left(\frac{P_d}{P_0} + 11\right)^2} = 0,406$$

* $P_d = P_t \cdot K_a$: Precipitación máxima diaria corregida (114,30 mm/día)

* K_a : Coeficiente reductor por área (0,94)

* P_t : Precipitación máxima diaria (122 mm/día)

* P_0 : Umbral de escorrentía (25mm)

- $P_d = 122 \cdot 0,94$ mm/día (P_t obtenido del software MaxPluwin)
- $P_0 = 18,78 \cdot 2,8 = 52,584$ mm* \rightarrow 25 mm

*No se admiten valores superiores a 25mm según la D.P. de Córdoba, por lo que se utilizará dicho valor máximo para la obtención del coeficiente de variación.

*Al no admitirse valores de C menores a 0,6, se toma este valor para el cálculo del caudal.

$$C = 0,6$$



2.1.2. CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN (I_T)

$$I_t = I_d \cdot \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{\frac{28^{0,1-t^{0,1}}}{28^{0,1}-1}}$$

* I_t : intensidad media horaria de precipitación (mm/h)

* $I_d = P_d / 24$ (mm/h)

* P_d : precipitación total diaria corregida correspondiente al período de retorno considerado (mm/día)

* I_1 : intensidad horaria de precipitación (mm/h)

* $t = T_c$: duración del intervalo al que se refiere I (h)

- La zona de estudio tiene un valor de $I_1/I_d = 8,5$ (adimensional)
- El tiempo de concentración calculado anteriormente es: **$t = 1,974$ horas**

$$I_d = P_d \text{ (mm/día)} / 24 \text{ (horas)} = 114,30/24 = \mathbf{5,08 \text{ mm/h.}}$$

Si el área de la cuenca $> 1 \text{ km}^2$, al valor de la intensidad se le aplica el coeficiente reductor por área (K_a).

$$K_a = 1 - \log \left(\frac{A}{15} \right)$$

* A : Superficie de la cuenca (km^2)

La K_a según la zona de Castro del Río = 0,94.

Introduciendo estos datos en la fórmula de la I_t , obtenemos una intensidad de precipitación para un periodo de retorno de 200 años igual a: **$27,658 \text{ mm/h}$**

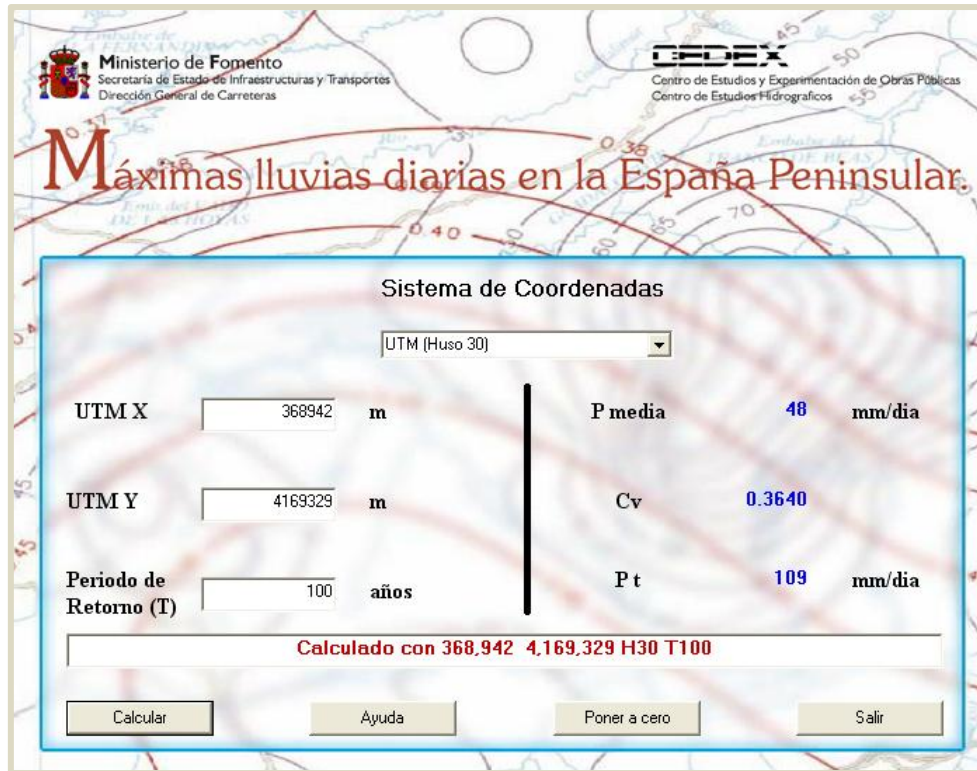
2.1.3. VARIABLES Y CÁLCULO DEL CAUDAL

- Precipitación máxima diaria = **122 mm/día**
- Tiempo de concentración (T_c) = **$1,974 \text{ h}$**
- $P_0 = 18,78 \cdot 2,8 = 52,584 \text{ mm} \rightarrow \mathbf{25 \text{ mm}}$
- Coef. Corrector: **$2,8$** (adimensional)
- Coeficiente de escorrentía: ~~$0,406$~~ $\rightarrow \mathbf{0,6}$ (adimensional)
- $I_1/I_d = 8,5$ (adimensional)
- Intensidad media horaria de precipitación (I_t): **$27,658 \text{ mm/h}$**
- Coeficiente de corrección de Témez aplicado a Q (K'): **$1,1432$** (adimensional)

$$Q_{T200} = \frac{I.A.C}{3,6} \cdot K' \quad ; \quad \mathbf{Q_{T200} = 46,59 \text{ m}^3/\text{s}}$$

2.2. CAUDAL ASOCIADO A UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS:

$$Q_{T100} = \frac{I.A.C}{3,6} \cdot K'$$



2.2.1. CÁLCULO DE C MEDIANTE EL MÉTODO RACIONAL.

$$C = \frac{\left(\frac{P_d}{P_0} - 1\right) \cdot \left(\frac{P_d}{P_0} + 23\right)}{\left(\frac{P_d}{P_0} + 11\right)^2} = 0,367$$

* $P_d = P_t K_a$: Precipitación máxima diaria corregida (102,12 mm/día)

* K_a : Coeficiente reductor por área (0,94)

* P_t : Precipitación máxima diaria (109 mm/día)

* P_0 : Umbral de escorrentía (25mm)

- $P_d = 109 \cdot 0,94$ mm/día (P_t obtenido del software MaxPluwin)
- $P_0 = 18,78 \cdot 2,8 = 52,584$ mm* \rightarrow 25 mm

*No se admiten valores superiores a 25mm según la D.P de Córdoba, por lo que se utilizará dicho valor máximo para la obtención del coeficiente de variación.

*Al no admitirse valores de C menores a 0,6, se toma este valor para el cálculo del caudal.

$$C = 0,6$$



2.2.2. CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN (I_T)

$$I_t = I_d \cdot \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{\frac{28^{0,1} - t^{0,1}}{28^{0,1} - 1}}$$

* I_t : intensidad media horaria de precipitación (mm/h)

* $I_d = P_d / 24$ (mm/h)

* P_d : precipitación total diaria corregida correspondiente al período de retorno considerado (mm)

* I_1 : intensidad horaria de precipitación (mm/h)

* $t = T_c$: duración del intervalo al que se refiere I (h)

- La zona de estudio tiene un valor de $I_1/I_d = 8,5$ (adimensional)
- El tiempo de concentración calculado anteriormente es: $t = 1,974$ horas

$$I_d = P_d \text{ (mm/día)} / 24 \text{ (horas)} = 102,12/24 = 4,26 \text{ mm/h.}$$

Si el área de la cuenca $> 1 \text{ km}^2$, al valor de la intensidad se le aplica el coeficiente reductor por área (K_a).

$$K_a = 1 - \log_{10} \left(\frac{A}{15} \right)$$

* A : Superficie de la cuenca (km^2)

En este caso, K_a tiene un valor de 0,94.

Introduciendo estos datos en la fórmula de la I_t , obtenemos una intensidad de precipitación para un periodo de retorno de 100 años igual a: **24,711 mm/h**

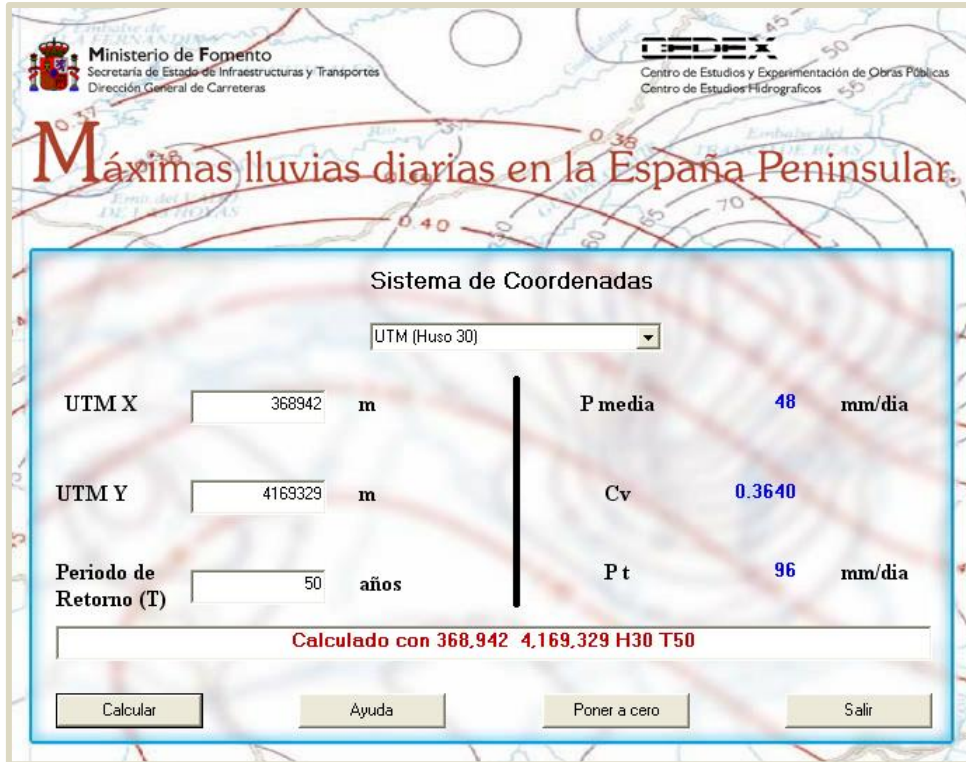
2.2.3. VARIABLES Y CÁLCULO DEL CAUDAL

- Precipitación máxima diaria = **109 mm/día**
- Tiempo de concentración (T_c) = **1,974 h**
- $P_0 = 18,78 \cdot 2,8 = 52,584 \text{ mm} \rightarrow \mathbf{25 \text{ mm}}$
- Coef. Corrector: **2,8 (adimensional)**
- Coeficiente de escorrentía: $0,367 \rightarrow \mathbf{0,6 \text{ (adimensional)}}$
- $I_1/I_d = \mathbf{8,5 \text{ (adimensional)}}$
- Intensidad media horaria de precipitación (I_t): **24,711 mm/h**
- Coeficiente de corrección de Témez aplicado a Q (K'): **1,1432 (adimensional)**

$$Q_{T100} = \frac{I.A.C}{3,6} \cdot K' \quad ; \quad Q_{T100} = \mathbf{41,62 \text{ m}^3/\text{s}}$$

2.3. CAUDAL ASOCIADO A UN PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS:

$$Q_{T50} = \frac{I.A.C}{3,6} \cdot K'$$



Ministerio de Fomento
Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes
Dirección General de Carreteras

CEDEX
Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
Centro de Estudios Hidrográficos

Máximas lluvias diarias en la España Peninsular.

Sistema de Coordenadas
UTM (Huso 30)

UTM X	368942	m	P media	48	mm/día
UTM Y	4169329	m	Cv	0.3640	
Periodo de Retorno (T)	50	años	P t	96	mm/día

Calculado con 368,942 4,169,329 H30 T50

Calcular Ayuda Poner a cero Salir

2.3.1. CÁLCULO DE C MEDIANTE EL MÉTODO RACIONAL.

$$C = \frac{\left(\frac{P_d}{P_0} - 1 \right) \cdot \left(\frac{P_d}{P_0} + 23 \right)}{\left(\frac{P_d}{P_0} + 11 \right)^2} = 0,324$$

* $P_d = P_t \cdot K_a$: Precipitación máxima diaria corregida (90,24 mm/día)

* K_a : Coeficiente reductor por área (0,94)

* P_t : Precipitación máxima diaria (96 mm/día)

* P_0 : Umbral de escorrentía (25mm)

- $P_d = 96 \cdot 0,94$ mm/día (P_t obtenido del software MaxPluwin)
- $P_0 = 18,78 \cdot 2,8 = 52,584$ mm* \rightarrow 25 mm

*No se admiten valores superiores a 25mm, por lo que se utilizará dicho valor máximo para la obtención del coeficiente de variación.

*Al no admitirse valores de C menores a 0,6, se toma este valor para el cálculo del caudal.

$$C = 0,6$$



2.3.2. CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN (I_T)

$$I_t = I_d \cdot \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{\frac{28^{0,1} - t^{0,1}}{28^{0,1} - 1}}$$

* I_t : intensidad media horaria de precipitación (mm/h)

* $I_d = P_d/24$ (mm/h)

* P_d : precipitación total diaria corregida correspondiente al período de retorno considerado (mm)

* I_1 : intensidad horaria de precipitación (mm/h)

* $t = T_c$: duración del intervalo al que se refiere I (h)

- La zona de estudio tiene un valor de $I_1/I_d = 8,5$ (adimensional)
- El tiempo de concentración calculado anteriormente es: $t = 1,974$ horas

$$I_d = P_d \text{ (mm/día)} / 24 \text{ (horas)} = 89,94/24 = 3,75 \text{ mm/h.}$$

Si el área de la cuenca $> 1 \text{ km}^2$, al valor de la intensidad se le aplica el coeficiente reductor por área (K_a).

$$K_a = 1 - \log \left(\frac{A}{15} \right)$$

* A : Superficie de la cuenca (km^2)

En este caso, K_a tiene un valor de 0,94.

Introduciendo estos datos en la fórmula de la I_t , se obtiene una intensidad de precipitación para un periodo de retorno de 50 años igual a: **21,763 mm/h**

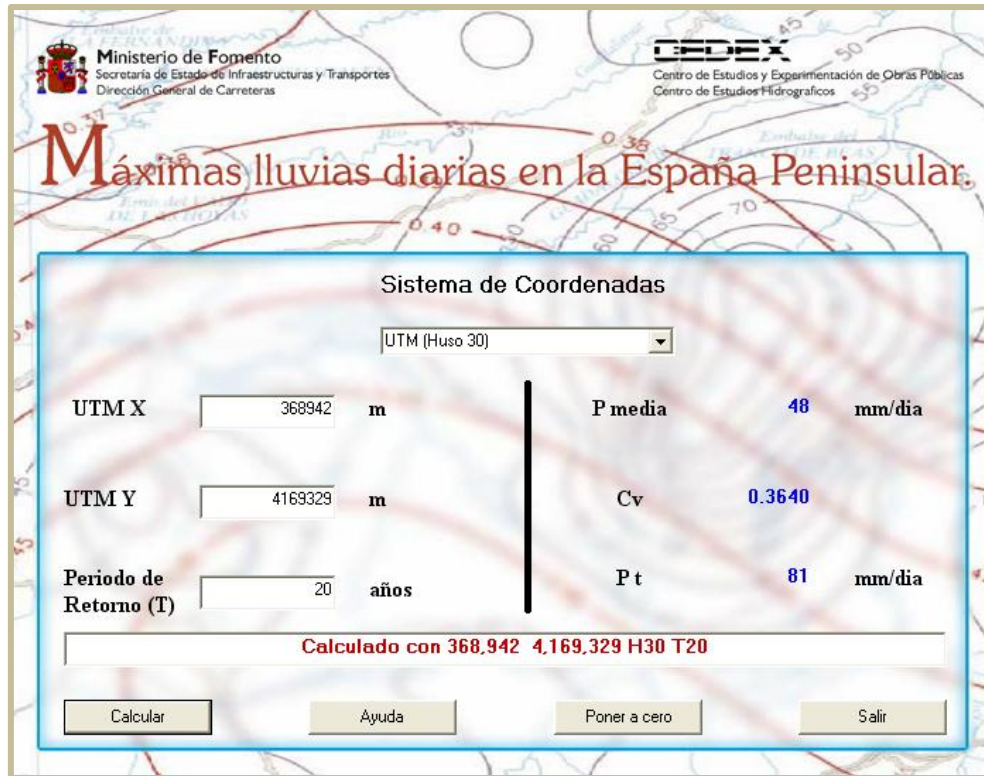
2.3.3. VARIABLES Y CÁLCULO DEL CAUDAL

- Precipitación máxima diaria = **96 mm/día**
- Tiempo de concentración (T_c) = **1,974 h**
- $P_0 = 18,78 \cdot 2,8 = 52,584 \text{ mm} \rightarrow 25 \text{ mm}$
- Coef. Corrector: **2,8 (adimensional)**
- Coeficiente de escorrentía: $0,324 \rightarrow 0,6$ (adimensional)
- $I_1/I_d = 8,5$ (adimensional)
- Intensidad media horaria de precipitación (I_t): **21,763 mm/h**
- Coeficiente de corrección de Témez aplicado a Q (K'): **1,1432 (adimensional)**

$$Q_{T50} = \frac{I.A.C}{3,6} \cdot K' \quad ; \quad Q_{T50} = 36,66 \text{ m}^3/\text{s}$$

2.4. PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 20 AÑOS:

$$Q_{T20} = \frac{I.A.C}{3,6} \cdot K'$$



2.4.1. CÁLCULO DE C MEDIANTE EL MÉTODO RACIONAL.

$$C = \frac{\left(\frac{P_d}{P_0} - 1 \right) \cdot \left(\frac{P_d}{P_0} + 23 \right)}{\left(\frac{P_d}{P_0} + 11 \right)^2} = 0,269$$

* $P_d = P_t K_a$: Precipitación máxima diaria corregida (76,1 mm/día)

* K_a : Coeficiente reductor por área (0,94)

* P_t : Precipitación máxima diaria (81 mm/día)

* P_0 : Umbral de escorrentía (25mm)

- $P_d = 81 \cdot 0,94$ mm/día (P_t obtenido del software MaxPluwin)
- $P_0 = 18,78 \cdot 2,8 = 52,584$ mm* \rightarrow 25 mm

*No se admiten valores superiores a 25mm, por lo que se utilizará dicho valor máximo para la obtención del coeficiente de variación.

*Al no admitirse valores de C menores a 0,6, se toma este valor para el cálculo del caudal.

$$C = 0,6$$



2.4.2. CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN (I_T)

$$I_t = I_d \cdot \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{\frac{28^{0,1} - t^{0,1}}{28^{0,1} - 1}}$$

** I_t : intensidad media horaria de precipitación (mm/h)*

** $I_d = P_d/24$ (mm/h)*

** P_d : precipitación total diaria corregida correspondiente al período de retorno considerado (mm)*

** I_1 : intensidad horaria de precipitación (mm/h)*

** $t = T_c$: duración del intervalo al que se refiere I (h)*

- La zona de estudio tiene un valor de $I_1/I_d = 8,5$ (adimensional)
- El tiempo de concentración calculado anteriormente es: **$t = 1,974$ horas**

$$I_d = P_d \text{ (mm/día)} / 24 \text{ (horas)} = 75,89/24 = 3,16 \text{ mm/h.}$$

Si el área de la cuenca $> 1 \text{ km}^2$, al valor de la intensidad se le aplica el coeficiente reductor por área (K_a).

$$K_a = 1 - \log \left(\frac{A}{15} \right)$$

** A : Superficie de la cuenca (km^2)*

En este caso, K_a tiene un valor de 0,94.

Introduciendo estos datos en la fórmula de la I_t , obtenemos una intensidad de precipitación para un periodo de retorno de 50 años igual a: **$18,363 \text{ mm/h}$**

2.4.3. VARIABLES Y CÁLCULO DEL CAUDAL

- Precipitación máxima diaria = **81 mm/día**
- Tiempo de concentración (T_c) = **$1,974 \text{ h}$**
- $P_0 = 18,78 \cdot 2,8 = 52,584 \text{ mm} \rightarrow \mathbf{25 \text{ mm}}$
- Coef. Corrector: **$2,8$** (adimensional)
- Coeficiente de escorrentía: ~~$0,269$~~ **$\rightarrow 0,6$** (adimensional)
- $I_1/I_d = \mathbf{8,5}$ (adimensional)
- Intensidad media horaria de precipitación (I_t): **$18,363 \text{ mm/h}$**
- Coeficiente de corrección de Témez aplicado a Q (K'): **$1,1432$** (adimensional)

$$Q_{T20} = \frac{I \cdot A \cdot C}{3,6} \cdot K' \quad ; \quad Q_{T20} = \mathbf{30,93 \text{ m}^3/\text{s}}$$



2.5. RESUMEN CÁLCULO CAUDALES

Parámetros comunes al cálculo de caudal para todos los periodos de retorno:

- Tiempo de concentración (T_c) = **1,974 h**
- $P_0 = 18,78 \cdot 2,8 = 52,584 \text{ mm} \rightarrow \mathbf{25 \text{ mm}}$ *Según recomendaciones de la D.P. de Córdoba
- Coef. Corrector: **2,8** (adimensional)
- $I_1/I_d = \mathbf{8,5}$ (adimensional)
- Coeficiente de corrección de Témez aplicado a Q (K): **1,1432** (adimensional)

Para Q_{T500}

- Precipitación máxima diaria = **140 mm/día**
- Coeficiente de escurrimiento: ~~0.406~~ $\rightarrow \mathbf{0.6}$ (adimensional)
- Intensidad media horaria de precipitación (I_t): **31,378 mm/h**

$$Q_{T500} = \mathbf{53,46 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Para Q_{T200}

- Precipitación máxima diaria = **122 mm/día**
- Coeficiente de escurrimiento: ~~0.406~~ $\rightarrow \mathbf{0.6}$ (adimensional)
- Intensidad media horaria de precipitación (I_t): **27,658 mm/h**

$$Q_{T200} = \mathbf{46,59 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Para Q_{T100}

- Precipitación máxima diaria = **109 mm/día**
- Coeficiente de escurrimiento: ~~0.367~~ $\rightarrow \mathbf{0.6}$ (adimensional)
- Intensidad media horaria de precipitación (I_t): **24,711 mm/h**

$$Q_{T100} = \mathbf{41,62 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Para Q_{T50}

- Precipitación máxima diaria = **96 mm/día**
- Coeficiente de escurrimiento: ~~0.324~~ $\rightarrow \mathbf{0.6}$ (adimensional)
- Intensidad media horaria de precipitación (I_t): **21,763 mm/h**

$$Q_{T50} = \mathbf{36,66 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Para Q_{T20}

- Precipitación máxima diaria = **81 mm/día**
- Coeficiente de escurrimiento: ~~0.269~~ $\rightarrow \mathbf{0.6}$ (adimensional)
- Intensidad media horaria de precipitación (I_t): **18,363 mm/h**

$$Q_{T20} = \mathbf{30,93 \text{ m}^3/\text{s}}$$



3. ESTUDIO HIDRÁULICO

El arroyo de las Canteras es un afluente del río Guadajoz por su margen izquierda. El arroyo nace en el Cerro del Viso y discurre únicamente por el término municipal de Castro del Río. Pertenece a la cuenca del Guadalquivir.

Tiene una longitud aproximada de 5,63 kilómetros, de los cuales 440 metros se encuentran canalizados.

3.1. DATOS DE PARTIDA

Como datos de partida se utilizarán la topografía de la zona y la pendiente del tramo, esta última explicada detalladamente en el anejo nº1 “Caracterización general de la zona de estudio”.

3.1.1. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

Para poder diseñar correctamente la simulación de caudales en las diferentes secciones mediante HEC-RAS, ha sido necesaria la toma de datos en campo para realizar un levantamiento topográfico con la precisión acorde a la escala requerida.

El levantamiento topográfico ha sido realizado en noviembre del 2013 por:

Francisco J. Martín Riveiro.
Ing. en Geodesia y Cartografía.
Ingeniero Técnico en Topografía.
Colegiado ITT nº 4374.
+34 610247419

METODOLOGÍA

En la toma de los datos taquimétricos, se ha empleado para la planimetría el sistema ETRS89 Huso 30 (huso para coordenadas U.T.M.), y para la altimetría altura altimétrica.

La toma de datos se ha realizado con una estación total G.N.S.S. de la marca Trimble, modelo RB-2 y un colector TSC-3. El sistema de trabajo aplicado con las estaciones ha sido el de bases postproceso-rinex y en puntos RTK-RTCM-NTRIP.

La longitud del tramo topografiado es de 678 metros aproximadamente, con un ancho de banda oscilante entre 17 metros y 58 metros. Se han generado 68 perfiles transversales, cada 10 metros. Se han emplazado tres bases para comprobaciones y replanteos durante la ejecución de las obras, con las siguientes coordenadas U.T.M. en metros:



B_ISLETA: X: 369814,050; Y: 4171807,044; Z: 220,023

B_HORMIG: X: 369928,715; Y: 4171817,875; Z: 219,465

PUENTE: X: 369956,550; Y: 4171998,750; Z: 217,512

*Los datos taquimétricos obtenidos en formato digital se encuentran en un apartado al *final de este anejo*.

RESULTADOS DEL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

Los resultados han sido dados en archivo de AUTOCAD:

- Representación en planta de la zona del levantamiento con indicación de los puntos tomados, las secciones realizadas en el canal, localización de puentes, zona hormigonada y detalles del terreno.
- Perfil longitudinal del tramo a escalas 1000:1000 y 1000:450.
- Perfiles transversales

Estos resultados pueden verse con detalle en el apartado de planos al *final de este anejo*.

3.1.1. VEGETACIÓN

Con respecto a la vegetación, la mayor parte de la cuenca está ocupada por olivar. Únicamente existen zonas de vegetación arbustiva y herbácea en los márgenes del arroyo.

Dicha vegetación natural está formada principalmente por enneas, carrizos, tarays y distintos tipos de herbáceas.



Fig. 4: Vegetación natural del arroyo de las Canteras. (Fotografía propia tomada en julio 2014)



Fig. 5: Vegetación natural del arroyo de las Canteras. (Fotografía propia tomada en julio 2014)

3.1.2. COEFICIENTES DE ROZAMIENTO

El principal problema que se plantea al analizar un curso de agua natural, es la estimación del coeficiente de Manning, “n”, pues son muchos los factores que intervienen en su cálculo. Al fijar un valor de n, lo que se está estimando es la resistencia a la escorrentía del terreno.

Los factores que intervienen con mayor influencia son:

- **RUGOSIDAD DE LA SUPERFICIE**: se refiere al tamaño y a la forma de los granos del material que forma el perímetro mojado. En corrientes aluviales en donde el material de los granos es fino, tal como la arena, arcilla, marga o cieno, el efecto retardante es mucho menor que donde el material es grueso, tal como cantos rodados o piedras. Cuando el material es fino, el valor de “n” es bajo y relativamente poco afectado por los cambios de flujo.
- **VEGETACIÓN**: puede ser vista como una clase de rugosidad superficial, pues reduce de forma sustancial la capacidad del canal y retarda el flujo. Este efecto depende principalmente de la altura, densidad, distribución y tipo de vegetación.
- **IRREGULARIDAD DEL CAUCE**: comprende irregularidades en el perímetro mojado y variaciones en la sección transversal, tamaño y forma a lo largo de la longitud del cauce. En general, un cambio gradual y uniforme en la sección transversal, tamaño y forma no afectará apreciablemente al valor de “n”, pero cambios bruscos o alternación de secciones pequeñas y grandes justifican el uso de un valor superior de “n”.



- **ALINEACIÓN DEL CAUCE:** curvaturas suaves con radios grandes darán un valor relativamente bajo de “n”, mientras que curvaturas agudas con meandros severos lo aumentarán.
- **DEPÓSITOS Y SOCAVACIONES:** en términos generales, los depósitos pueden cambiar un cauce irregular en uno comparativamente suave y disminuir n, mientras que la erosión puede hacer al revés y aumentar “n”. Ahora bien, depósitos dispares tales como barras y ondas de arena son irregularidades del cauce y aumentarán la rugosidad.
- **OBSTRUCCIÓN:** la presencia de pilares de puentes tiende a aumentar “n”. Depende la naturaleza de la obstrucción, tamaño, forma, número y distribución.
- **NIVEL Y CAUDAL:** el valor de “n” en la mayoría de los cauces decrece con el aumento en el nivel y en el caudal.

Concretamente, el cauce del arroyo de las Canteras en la zona de actuación, en la zona canalizada es totalmente de hormigón, sin embargo, en la zona naturalizada, los 150 metros aguas arriba del comienzo del entubado tienen un lecho de limos con alguna piedra dispersa, unos taludes con vegetación herbácea de baja altura y unas márgenes despejadas y destinadas a cultivos herbáceos.

Se ha tenido presente la variabilidad de geometría de la sección transversal, penalizando con ello el cálculo del coeficiente en el cauce.

En cada sección transversal se han fijado los valores del rozamiento de Manning, siguiendo las recomendaciones del manual “Hidráulica de los Canales Abiertos” de Ven Te Chow.

Se ha optado por distinguir el cauce asociado al caudal de Bankfull de la llanura, catalogada como una planicie con arbolado disperso.

Para la zona del canal, al ser este de hormigón se dará un valor de “n” de Manning al cauce principal de 0,013 y a la llanura de inundación un 0,03.

Para la zona naturalizada, la anterior al canal, se dará un valor de “n” de Manning para el cauce principal de 0,027 y para la llanura de inundación un 0,03.



Fig. 6: Vegetación existente en los márgenes del canal. (Fotografía propia tomada en julio 2014)



Dichos valores se obtienen de la tabla siguiente:

Tabla 3: Recopilación de valores de n de Manning, Obtenido de “Open-Channel Hydraulics” [Chow, 1959].

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
<i>A. Natural Streams</i>			
1. Main Channels			
a. Clean, straight, full, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f. Same as "d" but more stones	0.045	0.050	0.060
g. Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stands of timber and brush	0.070	0.100	0.150
2. Flood Plains			
a. Pasture no brush	0.025	0.030	0.035
1. Short grass	0.030	0.035	0.050
2. High grass			
b. Cultivated areas	0.020	0.030	0.040
1. No crop	0.025	0.035	0.045
2. Mature row crops	0.030	0.040	0.050
3. Mature field crops			
c. Brush	0.035	0.050	0.070
1. Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.060
2. Light brush and trees, in winter	0.040	0.060	0.080
3. Light brush and trees, in summer	0.045	0.070	0.110
4. Medium to dense brush, in winter	0.070	0.100	0.160
5. Medium to dense brush, in summer			
d. Trees	0.030	0.040	0.050
1. Cleared land with tree stumps, no sprouts	0.050	0.060	0.080
2. Same as above, but heavy sprouts	0.080	0.100	0.150
<i>B. Lined or Built-Up Channels</i>			
1. Concrete			
a. Trowel finish	0.011	0.013	0.015
b. Float Finish	0.013	0.015	0.016
c. Finished, with gravel bottom	0.015	0.017	0.020
d. Unfinished	0.014	0.017	0.020
e. Gunite, good section	0.016	0.019	0.023
f. Gunite, wavy section	0.018	0.022	0.025
g. On good excavated rock	0.017	0.020	
h. On irregular excavated rock	0.022	0.027	
2. Concrete bottom float finished with sides of:			
a. Dressed stone in mortar	0.015	0.017	0.020
b. Random stone in mortar	0.017	0.020	0.024
c. Cement rubble masonry, plastered	0.016	0.020	0.024
d. Cement rubble masonry	0.020	0.025	0.030
e. Dry rubble on riprap	0.020	0.030	0.035
3. Gravel bottom with sides of:			
a. Formed concrete	0.017	0.020	0.025
b. Random stone in mortar	0.020	0.023	0.026
c. Dry rubble or riprap	0.023	0.033	0.036
4. Brick			
a. Glazed	0.011	0.013	0.015
b. In cement mortar	0.012	0.015	0.018
5. Metal			
a. Smooth steel surfaces	0.011	0.012	0.014
b. Corrugated metal	0.021	0.025	0.030



Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
6. Asphalt			
a. Smooth	0.013	0.013	
b. Rough	0.016	0.016	
1. Earth, straight and uniform			
a. Clean, recently completed	0.016	0.018	0.020
b. Clean, after weathering	0.018	0.022	0.025
c. Gravel, uniform section, clean	0.022	0.025	0.030
d. With short grass, few weeds	0.022	0.027	0.033
2. Earth, winding and sluggish			
a. No vegetation	0.023	0.025	0.030
b. Grass, some weeds	0.025	0.030	0.033
c. Dense weeds or aquatic plants in deep channels	0.030	0.035	0.040
d. Earth bottom and rubble side	0.028	0.030	0.035
e. Stony bottom and weedy banks	0.025	0.035	0.040
f. Cobble bottom and clean sides	0.030	0.040	0.050
3. Dragline-excavated or dredged			
a. No vegetation	0.025	0.028	0.033
b. Light brush on banks	0.035	0.050	0.060
4. Rock cuts			
a. Smooth and uniform	0.025	0.035	0.040
b. Jagged and irregular	0.035	0.040	0.050
5. Channels not maintained, weeds and brush			
a. Clean bottom, brush on sides	0.040	0.050	0.080
b. Same as above, highest stage of flow	0.045	0.070	0.110
c. Dense weeds, high as flow depth	0.050	0.080	0.120
d. Dense brush, high stage	0.080	0.100	0.140

3.2. METODOLOGÍA.

Se ha modelizado el régimen hidráulico del arroyo de las Canteras estudiado en el término municipal de Castro del Río (Córdoba) a través del programa informático HEC-RAS 4.1.0. del U.S. Arms Corps Of Engineers. Los cálculos se realizan en todos los casos en régimen mixto, para la avenida asociada al periodo de retorno de 500 años, ya que esta es la requerida en la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir para que exista seguridad suficiente frente a inundaciones en núcleos urbanos.

3.2.1. SECCIONES MODELIZADAS

Las secciones se encuentran numeradas de aguas abajo hacia aguas arriba. Las situaciones y secciones actuales del cauce modelizado (perfiles transversales) son las siguientes:

20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 210, 220, 230, 240, 250, 260, 270, 280, 290, 300, 310, 320, 330, 340, 350, 360, 370, 380, 390, 400, 410, 420, 430, 440, 450, 460, 470, 480, 490, 500, 510, 520, 530, 540, 550, 560, 570, 580, 590, 600, 610, 620, 630, 640, 650 y 660.

Las secciones modelizadas en HEC-RAS son las siguientes:

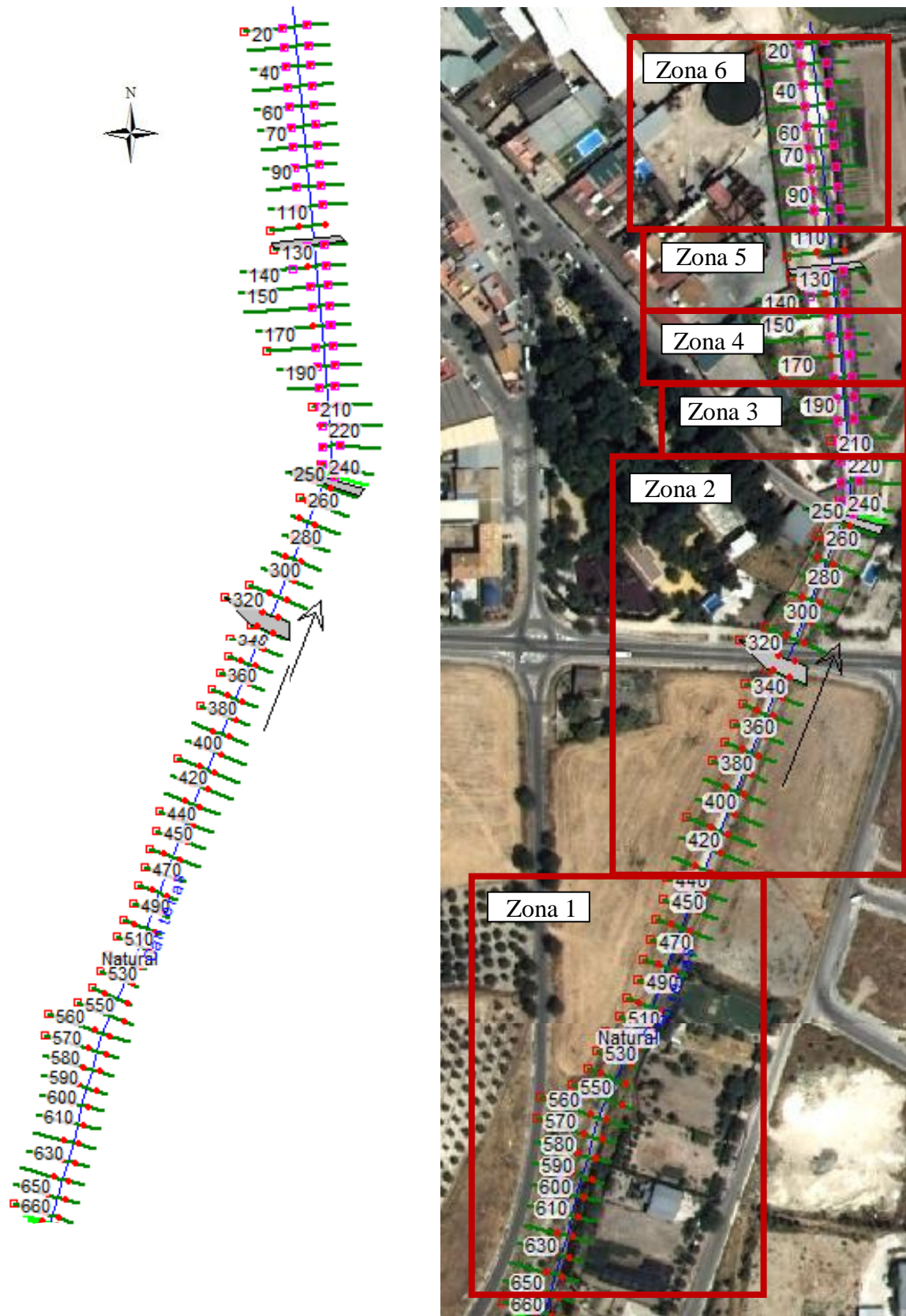


Fig. 7: Planta de perfiles. Elaboración mediante HEC-RAS.

El tramo modelizado se inicia en la sección 20 y finaliza en la 660, abarcando un total de 644 metros. En total hay 71 secciones transversales, 65 obtenidas del levantamiento topográfico con una separación entre ellas de 10 metros, y 6 correspondientes a las secciones aguas arriba y aguas debajo de los 3 puentes existentes. En las siguientes fotografías-tipo se observan y caracterizan los distintos tramos:

ZONA 1: TRAMO SIN CANALIZAR

En primer lugar se observa el tramo sin canalizar situado antes del comienzo del canal. Se encuentra a las afueras de Castro del Río y está comprendido entre las secciones 660 y 440.

Dicho tramo carece de vegetación natural (únicamente herbáceas y algunos carrizos en el lecho) debido a que es desbrozado periódicamente ya que se quiere tener “limpio” de vegetación por la existencia de áreas de cultivo en los márgenes de este.



Fig. 8: Tramo naturalizado anterior al canal. Fotografía propia tomada en julio 2014.

ZONA 2: PRIMER TRAMO DE CANAL, CANAL TRAPEZOIDAL RECTO

La siguiente fotografía corresponde al primer tramo del canal, corresponde con la zona de canal recto con sección trapezoidal. Este tramo se encuentra a las afueras de Castro del Río entre las secciones 440 y 220.

Dicho canal está realizado con hormigón, existen varios escalones de 30 cm de altura por lo que se observa una primera parte seca y una segunda (después del escalón) con agua estancada. Al fondo se observa el primer puente por el que pasa la Carretera Nacional N-432.

La vegetación existente fuera del canal sigue estando compuesta por herbáceas ya que también es desbrozada periódicamente debido a la existencia de campos de cultivo justo al acabar el talud.



Fig. 9: Primer tramo del canal y primer puente al fondo. Fotografía propia tomada en julio 2014.

El tramo posterior al primer puente ya se encuentra dentro del núcleo de Castro del Río. Atraviesa una zona con viviendas por lo que no se deben producir desbordamientos en esta zona.

A ambos lados del canal hay un poco de terreno que no pertenece a ninguna parcela por lo que se podría utilizar para aumentar la sección de éste.

Al fondo de la imagen se observa la curva que realizad el canal y el segundo puente.



Fig. 10: Recta del canal visualizada desde el primer puente y curva al fondo. Fotografía propia tomada en julio 2014.

ZONA 3: ZONA INMEDIATAMENTE POSTERIOR A LA CURVA

Este tramo corresponde a la zona posterior a la curva del canal, situada entre las secciones 220 y 180. Esta es la zona problemática donde se producen los desbordamientos. Se observa la falta de barandilla en una zona ya que fue arrancada por el agua (marcado en rojo). El agua salta en esta zona debido a la inclinación del revestimiento del canal y a la fuerza centrífuga que actúa sobre ella.



Fig. 11: Zona del canal posterior a la curva visualizada desde el segundo puente. Fotografía propia tomada en julio 2014.

ZONA 4: ÚLTIMO TRAMO DE CANAL TRAPEZOIDAL

Se encuentra entre las secciones 180 y 140

ZONA 5: ZONA DE PASO DE CANAL TRAPEZOIDAL A RECTANGULAR

En esta zona se observa el tránsito de la parte del canal con sección trapezoidal con la parte de sección rectangular, localizado entre las secciones 140 y 100. Se puede ver el tercer y último puente del canal.



Fig. 12: Último tramo de canal trapezoidal y paso a la parte rectangular. Fotografía propia tomada en julio 2014.

ZONA 6: TRAMO RECTANGULAR DEL CANAL

Con este tramo finaliza el canal, se localiza desde la sección 100 hasta la desembocadura. Se aumenta enormemente la sección pasando de 6.8 a 12 metros de anchura, además la altura del muro también es mayor por lo que en esta zona no existen problemas de desbordamientos.

No se observa acumulación de sedimentos en ninguna parte del canal, por lo que la pendiente es la adecuada para que estos sean arrastrados y no se depositen produciendo obstrucciones.



Fig. 13: Tramo final del canal visualizado desde el tercer y último puente. Fotografía propia tomada en julio 2014.

El canal desemboca directamente en el río Guadajoz, unos dos metros por encima de la lámina de agua de este último.



Fig. 14: Salto de la desembocadura del canal. Fotografía propia tomada en julio 2014.



3.2.2. BASES DE CÁLCULO

El software utilizado realiza los cálculos para un nivel de agua unidimensional en cada sección transversal del cauce en régimen de flujo gradualmente variado. Las hipótesis básicas de partida son:

- Pérdidas de carga valoradas según Manning.
- Flujo estacionario, el tiempo no interviene en los cálculos.
- Flujo gradualmente variado.
- Flujo unidimensional, la altura de la curva de energía es la misma en todos los puntos de la sección.
- No se admite cambio de régimen en un mismo cálculo.
- La pendiente de la línea de energía es constante entre dos secciones transversales.

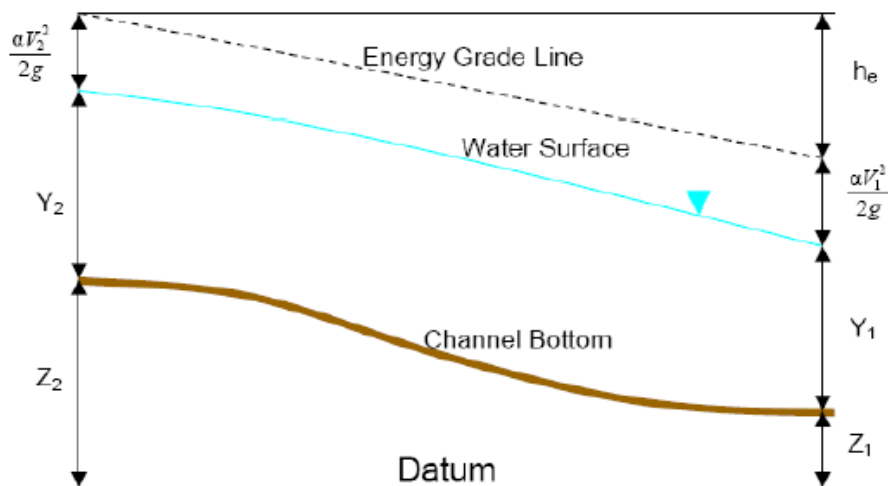


Fig. 15: Modelo de cálculo

Los niveles del agua en cada sección se calculan a partir de una sección transversal hacia la siguiente mediante la resolución de la ecuación de la Energía.

La energía específica en la sección de un canal se define como la energía por peso de agua en cualquier sección de un canal, medida con respecto al fondo del mismo.

La energía total de la sección de un canal puede expresarse como:

Ecuación 7

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2g} + h_e$$

* WS_i : elevaciones de superficie de agua en secciones transversales.

* V_i : velocidad media (descarga total/área total de caudal).

* α : coeficientes de medida de velocidad.

* g : aceleración gravitatoria.

* h_e : pérdidas de energía en cabeza.



Las pérdidas de energía principales entre dos secciones transversales se calculan como la suma de las pérdidas de fricción y las de contracción o expansión, y vienen dadas por la expresión:

Ecuación 8
$$h_e = L \cdot S_f + C \cdot \left| \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2 \cdot g} - \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2 \cdot g} \right|$$

**L: longitud del tramo de desagüe.*

**S_f: pendiente de fricción representativa entre dos secciones.*

**C: coeficiente de pérdida por expansión o contracción (hace referencia al trazado en planta del tramo estudiado).*

La determinación de la conducción total y el coeficiente de velocidad para una sección transversal requieren que el flujo sea subdividido en unidades para las que la velocidad esté uniformemente distribuida, unidades que vienen marcadas por los puntos de salto del valor n de Manning.

La conducción se calcula dentro de cada subdivisión por la siguiente ecuación:

Ecuación 9
$$k = \frac{1,486}{n} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}}$$

**K: conducción por subdivisión.*

**n: coeficiente de rugosidad de Manning por subdivisión.*

**A: área de caudal por subdivisión.*

**R: radio hidráulico por subdivisión.*

El coeficiente de velocidad α se calcula basándose en la conducción en los tres elementos de caudal: margen izquierdo, margen derecho y canal. Se obtiene con la siguiente ecuación:

Ecuación 10
$$\alpha = \frac{A_t^2 \cdot \left[\frac{K_{lob}^3}{A_{lob}^2} + \frac{K_{ch}^3}{A_{ch}^2} + \frac{K_{rob}^3}{A_{rob}^2} \right]}{K_t^3}$$

**A_t: área total de caudal de sección transversal.*

**A_{lob}, A_{ch}, A_{rob}: áreas de caudal de margen izquierdo, canal principal y margen derecho.*

**K_t: conducción total de sección transversal.*

**K_{lob}, K_{ch}, K_{rob}: conducción de margen izquierdo, canal principal y margen derecho, respectivamente.*

La pérdida de fricción se evalúa como el producto de S_f y L, donde S_f es la pendiente de fricción representativa para un tramo y se calcula mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 11
$$S_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)$$



La elevación de la superficie del agua desconocida en una sección se determina por una solución iterativa de las Ecuaciones 8 y 9. El procedimiento seguido es el siguiente:

1. Se supone una elevación de superficie de agua en la sección aguas arriba.
2. Basándose en ese supuesto, se determina la conducción total correspondiente y el frente de velocidad.
3. Con los valores del paso 2, se calcula S_f y se resuelve la ecuación 9 para h_e .
4. Con los valores de 9 y 10 se resuelve la ecuación 8 para WS_2 .
5. Comparación del valor calculado de WS_2 , con el valor supuesto en el paso 1, repitiendo los pasos hasta que los valores concuerden dentro de 0,003 m.

El programa usado está restringido a un número máximo de iteraciones, 40 como máximo, para equilibrar la superficie del agua. Cuando se ha obtenido una cota elevación de superficie de agua 'equilibrada' para una sección transversal, se hacen las revisiones para asegurar que la elevación está en la zona correcta respecto de la profundidad crítica calculada.

3.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno se introducen tanto aguas arriba como aguas abajo del tramo modelizado. Son necesarias para el inicio del proceso iterativo de cálculo.

De las alternativas que contempla el programa se ha elegido tanto para el inicio del modelo, esto es, aguas arriba, como para la condición de contorno aguas abajo, la pendiente del tramo.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez realizada la modelización con HEC-RAS de todas las avenidas de cálculo en el tramo de arroyo a estudiar, se analizarán las conclusiones a las que se llega con el modelo hidráulico, aunque por claridad en la exposición, solo se representarán los resultados obtenidos para el caudal asociado al periodo de retorno de 500 años.

Dichos resultados son los que más interesan para ponerse del lado de la seguridad con respecto a posibles desbordamientos al encontrarse en un tramo periurbano.

Principalmente, se adjuntan las gráficas de velocidades y del n° de Froude, así como la tabla resumen de los resultados obtenidos. Además, se mostrarán las cotas de lámina de agua para las distintas secciones del canal y la llanura de inundación obtenida.

4.1. PERFIL LONGITUDINAL

Con el perfil longitudinal se observan los cambios de pendiente que se producen a lo largo del tramo y las cotas del lecho en cada sección.

El perfil longitudinal del tramo de estudio según la modelización realizada con HEC-RAS es el siguiente:

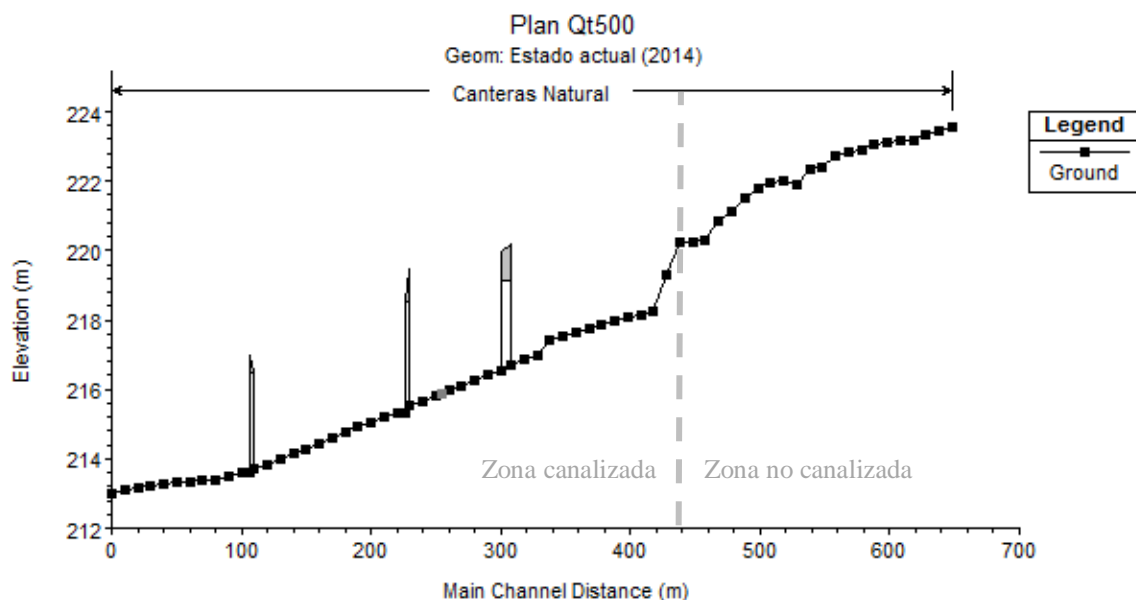


Fig. 16: Perfil longitudinal. Obtenido de HEC-RAS

El canal tiene una pendiente media de 0,011 m/m.

El mismo perfil longitudinal una vez modelizado el caudal asociado al periodo de retorno de 500 años es el siguiente:

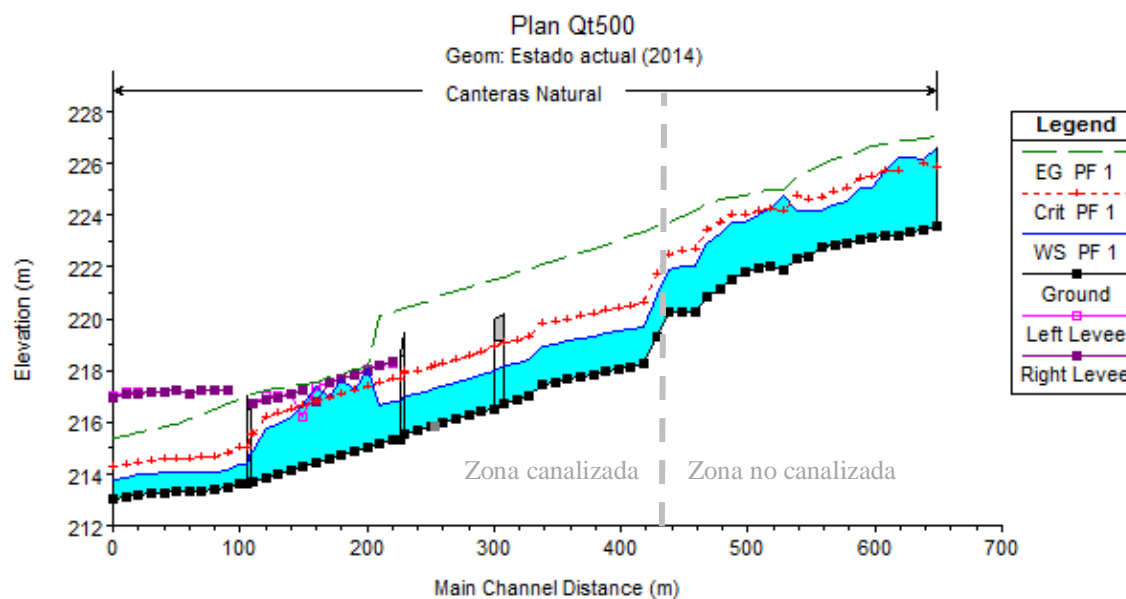


Fig. 17: Perfil longitudinal del tramo de actuación. Obtenido de HEC-RAS



4.2. GRÁFICO DE VELOCIDADES

El gráfico de velocidades obtenido para el tramo de estudio, indica unas velocidades muy elevadas en prácticamente todas las zonas, fundamentalmente en la primera recta del canal, con unas velocidades que alcanzan los 8,1 m/s.

Se observa claramente los cambios de velocidad que existen al pasar de una zona a otra de la zona de estudio:

La primera zona localizada entre las secciones con velocidades muy heterogéneas correspondientes a la zona no canalizada del tramo de estudio, se produce un aumento de la velocidad, manteniéndose constante durante el primer tramo rectilíneo del canal.

El cambio de velocidad más importante se da pasando la curva del canal, zona localizada entre las secciones 220 y 180, reduciéndose ésta notablemente.

Finalmente el cambio de sección trapezoidal a cuadrangular entre las secciones 100 y 140 produce un leve aumento de la velocidad que desemboca en una bajada de velocidad casi 1 m/s al aumentar la sección en el último tramo.

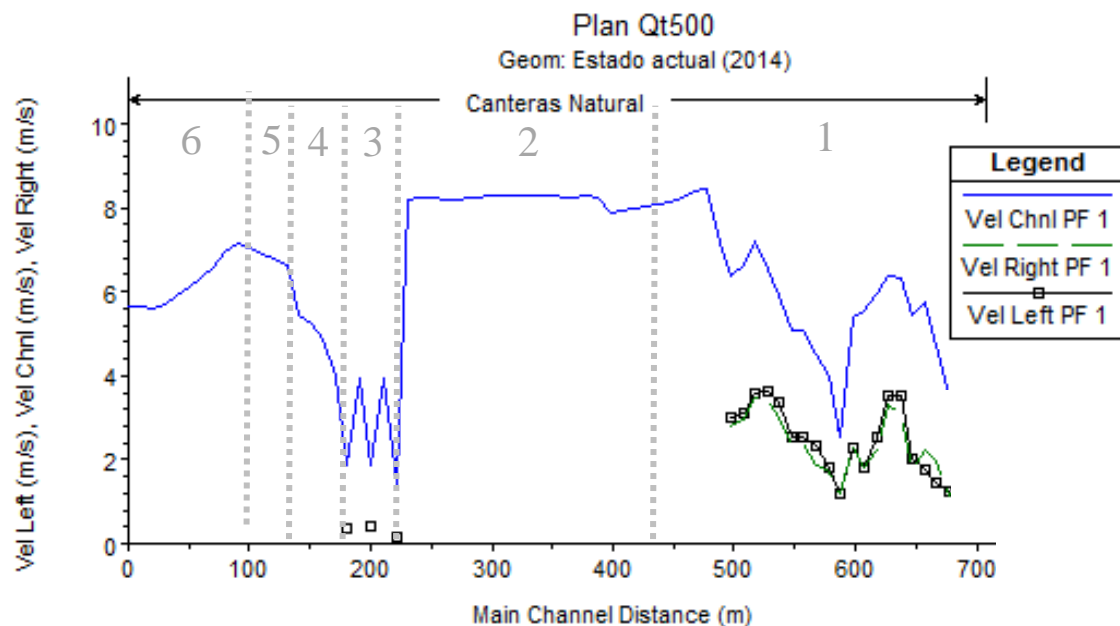


Fig. 18: Gráfico de velocidades para el tramo de estudio. Obtenido de HEC-RAS

Analizando las velocidades alcanzadas, se observa que en muchos tramos se alcanzan velocidades mayores a 6 m/s, el límite para revestimientos de hormigón, sin embargo, si no son unos caudales continuos, es decir, eventos puntuales de corta duración, puede resistir velocidades mayores, esto se puede verificar ya que el hormigón del canal no se encuentra dañado.



Tabla 4: Velocidad máxima permitida en cauces para que no se produzca erosión. Obtenida de la MOPU Instrucción 5.2-IC

Naturaleza de la superficie	Máxima velocidad admisible (m/s)
Arena fija o limo (poca o ninguna arcilla)	0,20 - 0,60
Arena arcillosa dura, margas duras	0,60 - 0,90
Terreno parcialmente cubierto de vegetación	0,60 - 1,20
Arcilla, grava, pizarras blandas con cubierta vegetal	1,20 - 1,50
Hierba	1,20 - 1,80
Conglomerados, pizarras duras, rocas blandas	1,40 - 2,40
Mampostería, rocas duras	3,00 - 4,50
Hormigón	4,50 - 6,00

La velocidad mínima para que no se produzca sedimentación es de 0,30 m/s, efectivamente el canal se mantiene limpio siempre ya que se alcanzan velocidades mayores todos los años.

4.3. GRÁFICO DEL NÚMERO DE FROUDE

El número de Froude en canales abiertos informa del estado del flujo hidráulico. Éste se basa en los efectos de viscosidad y gravedad relativa a las fuerzas de inercia del flujo.

Efecto de viscosidad: Dependiendo del efecto de la viscosidad relativa a la inercia, el flujo puede ser laminar, turbulento o de transición.

- Flujo laminar: fuerzas viscosas >> fuerzas de inercia. La viscosidad juega un papel importante para determinar el comportamiento del flujo. En flujo laminar, las partículas del fluido parecen moverse en recorridos calmados definidos, o líneas de corriente, y las capas del fluido parecen deslizarse sobre las capas adyacentes.
- Flujo turbulento: fuerzas viscosas << fuerzas de inercia. En el flujo turbulento, las partículas del fluido se mueven en recorridos irregulares, los cuales no son ni calmados ni determinados pero en su conjunto todavía representan el movimiento hacia adelante de la corriente total.
- Flujo mixto: Estado intermedio entre laminar y turbulento.

Efecto de la gravedad. El efecto de la gravedad sobre el estado del flujo se representa por una relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad.

En conclusión, el número de Froude en un canal abierto se define como:

Ecuación 12
$$F_R = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D_H}}$$

**v*: velocidad media de la sección del canal [m/s].

**g*: aceleración de la gravedad [m/s²].

**D_H*: Profundidad hidráulica (A/T) [m].

*A: área de la sección transversal del flujo [m^2].

*T: ancho de la lámina libre [m].

En el caso de que:

- Sea $F_R < 1$ el régimen del flujo será **supercrítico**
- Sea $F_R = 1$ el régimen del flujo será **crítico**
- Sea $F_R > 1$ el régimen del flujo será **subcrítico**

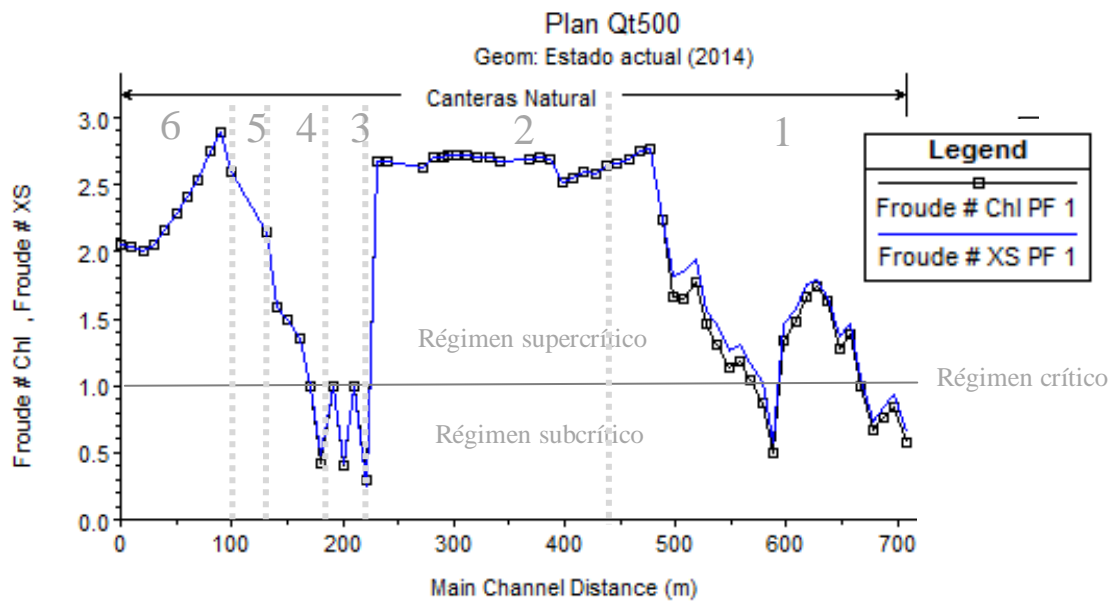


Fig. 19: Gráfico del número de Froude. Obtenido de HEC-RAS

Analizando el gráfico, se observa una clara zonificación al igual que en el gráfico de velocidades, realizándose las variaciones en el número de Froude en los mismos puntos de cambio de velocidad de las secciones anteriormente definidas. En estas zonas de cambio de régimen es necesario reforzar el lecho debido a la producción de resaltos hidráulicos con elevada turbulencia.

En la mayor parte del tramo de estudio el régimen es supercrítico, sin embargo en algunas partes del tramo naturalizado y en la parte de después de la curva del canal, donde se produce el desbordamiento, el régimen es subcrítico.

4.4. TABLA RESUMEN DE LOS RESULTADOS

En la siguiente tabla de datos, se reflejan, de forma numérica, los valores obtenidos para cada sección de los valores obtenidos con HEC-RAS de los siguientes parámetros:

Caudal total en una sección (Q Total), Cota mínima en el canal principal (Min Ch El), Cota de lámina de agua (W.S. Elev), Cota de la lámina para el calado crítico (Crit



W.S.), Elevación de la línea de energía (E.G. Elev), Pendiente de la línea de energía (E.G. Slope), Velocidad media en el canal principal (Vel Chnl), Área de flujo activo de toda la sección (Flow Área), Ancho de la sección (Top Width) y Número de Froude para el canal principal (Froude #Chl).

Tabla 5: Resultados numéricos de la modelización. Obtenido de HEC-RAS

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Natural	670	PF 1	53.46	223.5	226.63	225.89	227.06	0.001945	3.06	20.17	9.65	0.58
Natural	660	PF 1	53.46	223.5	226.18	226.02	227.00	0.004492	4.14	14.61	7.84	0.84
Natural	650	PF 1	53.46	223.3	226.23	225.89	226.93	0.003586	3.90	16.05	8.12	0.76
Natural	640	PF 1	53.46	223.2	226.27	225.68	226.86	0.002771	3.52	17.04	7.72	0.66
Natural	630	PF 1	53.46	223.2	225.74	225.74	226.78	0.005976	4.70	13.00	6.93	0.99
Natural	620	PF 1	53.46	223.1	225.05	225.48	226.64	0.012243	5.73	10.25	6.92	1.38
Natural	610	PF 1	53.46	223.1	225.06	225.41	226.48	0.010298	5.42	10.84	7.11	1.27
Natural	600	PF 1	53.46	222.9	224.56	225.08	226.32	0.016878	6.33	9.87	7.73	1.64
Natural	590	PF 1	53.46	222.9	224.35	224.90	226.14	0.019593	6.36	9.74	8.71	1.73
Natural	580	PF 1	53.46	222.8	224.19	224.71	225.93	0.018947	5.98	9.60	8.42	1.67
Natural	570	PF 1	53.46	222.4	224.17	224.62	225.70	0.015345	5.54	10.13	8.20	1.47
Natural	560	PF 1	53.46	222.3	224.17	224.74	225.52	0.011582	5.37	11.22	8.83	1.34
Natural	550	PF 1	53.46	221.9	224.76	224.15	225.01	0.001392	2.52	27.66	18.02	0.50
Natural	540	PF 1	53.46	222.0	224.27	224.27	224.95	0.004494	4.00	16.87	13.09	0.88
Natural	530	PF 1	53.46	221.9	224.03	224.17	224.88	0.006397	4.53	14.89	11.98	1.04
Natural	520	PF 1	53.46	221.8	223.75	224.02	224.79	0.008258	5.09	13.58	11.24	1.18
Natural	510	PF 1	53.46	221.5	223.73	223.99	224.70	0.007526	5.06	14.23	11.68	1.14
Natural	500	PF 1	53.46	221.1	223.31	223.70	224.58	0.012621	5.92	12.12	10.11	1.30
Natural	490	PF 1	53.46	220.8	222.9	223.42	224.43	0.013941	6.51	11.06	8.66	1.46
Natural	480	PF 1	53.46	220.3	222.05	222.69	224.20	0.020993	7.20	9.35	8.24	1.77
Natural	470	PF 1	53.46	220.2	222.00	222.65	223.95	0.01748	6.63	9.65	8.43	1.65
Natural	460	PF 1	53.46	220.2	221.88	222.47	223.75	0.017918	6.39	9.67	8.61	1.66
Natural	450	PF 1	53.46	219.3	220.94	221.71	223.55	0.009606	7.15	7.48	7.16	2.23
Natural	440	PF 1	53.46	218.3	219.69	220.63	223.33	0.015049	8.45	6.33	6.64	2.76
Natural	430	PF 1	53.46	218.1	219.58	220.49	223.17	0.01493	8.40	6.37	6.71	2.75
Natural	420	PF 1	53.46	218.1	219.54	220.42	222.99	0.014195	8.23	6.50	6.80	2.69
Natural	410	PF 1	53.46	218.0	219.44	220.31	222.83	0.013876	8.16	6.55	6.85	2.66
Natural	400	PF 1	53.46	217.9	219.33	220.20	222.67	0.013636	8.10	6.60	6.89	2.64
Natural	390	PF 1	53.46	217.8	219.25	220.12	222.52	0.013088	8.01	6.68	6.83	2.59
Natural	380	PF 1	53.46	217.7	219.13	219.99	222.38	0.013127	7.99	6.69	6.90	2.59
Natural	370	PF 1	53.46	217.5	219.04	219.89	222.23	0.012705	7.92	6.75	6.87	2.55
Natural	360	PF 1	53.46	217.4	218.94	219.78	222.08	0.012439	7.86	6.80	6.88	2.52
Natural	350	PF 1	53.46	217.0	218.44	219.32	221.91	0.014249	8.26	6.47	6.74	2.69
Natural	340	PF 1	53.46	216.9	218.29	219.18	221.77	0.014422	8.27	6.46	6.81	2.71
Natural	330	PF 1	53.46	216.7	218.16	219.08	221.61	0.014214	8.23	6.50	6.82	2.69



Natural	320.1		Bridge									
Natural	320	PF 1	53.46	216.5	218.00	218.92	221.49	0.014109	8.28	6.45	6.58	2.67
Natural	310	PF 1	53.46	216.4	217.85	218.73	221.34	0.014316	8.28	6.46	6.73	2.70
Natural	300	PF 1	53.46	216.2	217.71	218.58	221.20	0.014406	8.28	6.46	6.78	2.71
Natural	290	PF 1	53.46	216.1	217.55	218.43	221.05	0.014476	8.29	6.45	6.77	2.71
Natural	280	PF 1	53.46	216.0	217.41	218.28	220.91	0.014510	8.29	6.45	6.80	2.72
Natural	274.*	PF 1	53.46	215.9	217.30	218.18	220.81	0.014589	8.31	6.44	6.79	2.72
Natural	270	PF 1	53.46	215.8	217.27	218.14	220.73	0.014337	8.25	6.48	6.83	2.70
Natural	260	PF 1	53.46	215.7	217.12	217.99	220.59	0.014318	8.25	6.48	6.80	2.70
Natural	250	PF 1	53.46	215.5	217.01	217.93	220.43	0.013621	8.20	6.52	6.56	2.62
Natural	248		Bridge									
Natural	240	PF 1	53.46	215.3	216.79	217.67	220.23	0.014006	8.22	6.50	6.73	2.67
Natural	230	PF 1	53.46	215.2	216.67	217.54	220.08	0.013995	8.19	6.53	6.81	2.67
Natural	220	PF 1	53.46	215.0	218.08	217.38	218.14	0.000169	1.39	62.78	31.33	0.30
Natural	210	PF 1	53.46	214.9	217.27	217.27	218.06	0.001833	3.95	13.54	8.50	1.00
Natural	200	PF 1	53.46	214.8	217.68	217.09	217.80	0.000315	1.86	48.6	35.67	0.41
Natural	190	PF 1	53.46	214.6	216.93	216.93	217.72	0.001825	3.95	13.54	8.50	1.00
Natural	180	PF 1	53.46	214.4	217.38	216.79	217.51	0.000323	1.88	49.87	45.53	0.41
Natural	170	PF 1	53.46	214.3	216.63	216.63	217.43	0.001847	3.97	13.46	8.39	1.00
Natural	160	PF 1	53.46	214.1	216.17	216.47	217.38	0.003354	4.86	10.99	8.36	1.35
Natural	150	PF 1	53.46	214.0	215.93	216.32	217.32	0.004129	5.22	10.25	8.31	1.50
Natural	140	PF 1	53.46	213.8	215.75	216.19	217.26	0.004643	5.44	9.83	8.19	1.58
Natural	130	PF 1	53.46	213.7	214.87	215.52	217.12	0.008889	6.64	8.05	8.18	2.14
Natural	124		Bridge									
Natural	120	PF 1	53.46	213.6	214.37	215.04	216.90	0.013986	7.05	7.58	10.07	2.59
Natural	110	PF 1	53.46	213.5	214.13	214.77	216.73	0.018344	7.15	7.48	11.96	2.89
Natural	100	PF 1	53.46	213.4	214.06	214.68	216.50	0.016624	6.92	7.72	11.98	2.75
Natural	90	PF 1	53.46	213.4	214.06	214.65	216.28	0.013980	6.59	8.11	11.82	2.54
Natural	80	PF 1	53.46	213.3	214.05	214.62	216.09	0.012393	6.33	8.44	11.95	2.40
Natural	70	PF 1	53.46	213.3	214.04	214.57	215.94	0.011117	6.12	8.74	11.95	2.28
Natural	60	PF 1	53.46	213.3	214.03	214.55	215.81	0.009904	5.90	9.07	11.89	2.16
Natural	50	PF 1	53.46	213.2	214.02	214.50	215.68	0.008918	5.70	9.37	11.98	2.06
Natural	40	PF 1	53.46	213.2	213.98	214.45	215.58	0.008507	5.61	9.52	11.95	2.01
Natural	30	PF 1	53.46	213.1	213.88	214.35	215.50	0.008711	5.64	9.48	12.07	2.03
Natural	20	PF 1	53.46	213.0	213.78	214.26	215.42	0.008948	5.66	9.44	12.23	2.06

5. ANÁLISIS DE INUNDABILIDAD

Se analiza si el canal actual es funcional para el caudal asociado a un periodo de retorno de 500 años. Dicho periodo de retorno debe ser tal para ofrecer un nivel de seguridad adecuado ya que el canal discurre cerca de una zona urbana (para los periodos de retorno T200, T100, T50 y T20 el arroyo no se desborda según la modelización realizada con HEC-RAS).



Dado que han existido inundaciones los años anteriores, el diseño del canal no es el adecuado. Por ello, se han analizado cuales son las zonas problemáticas que producen el desbordamiento de dicho canal analizando la cota de la lámina de agua resultante de la modelización con HEC-RAS.

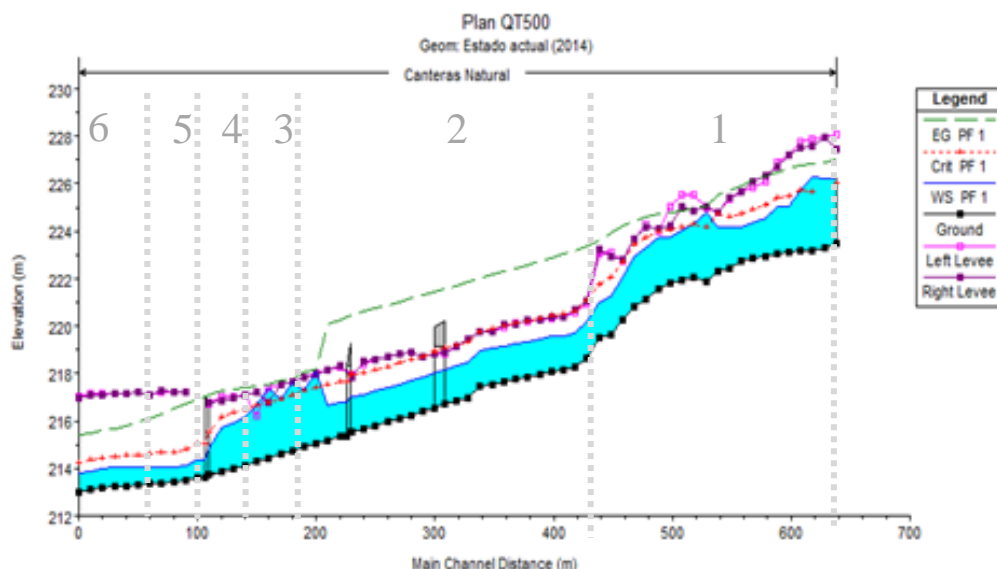
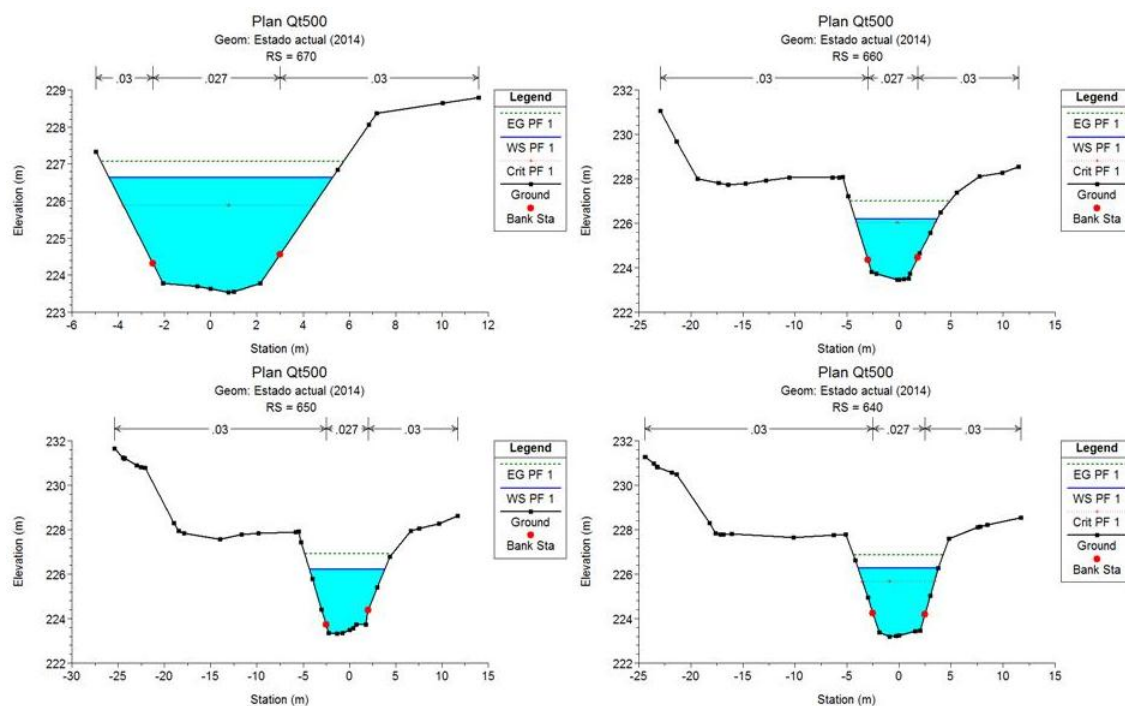
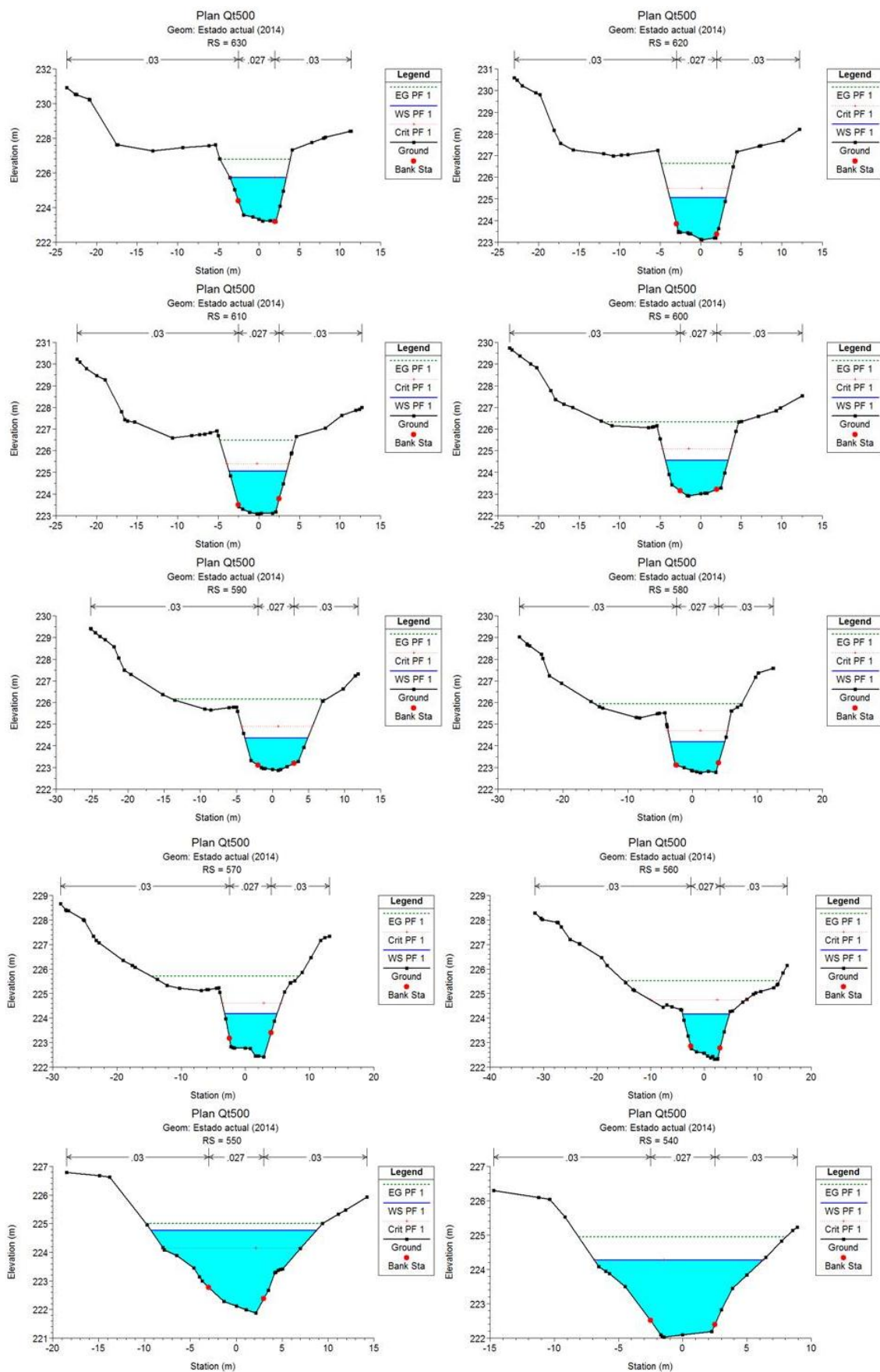


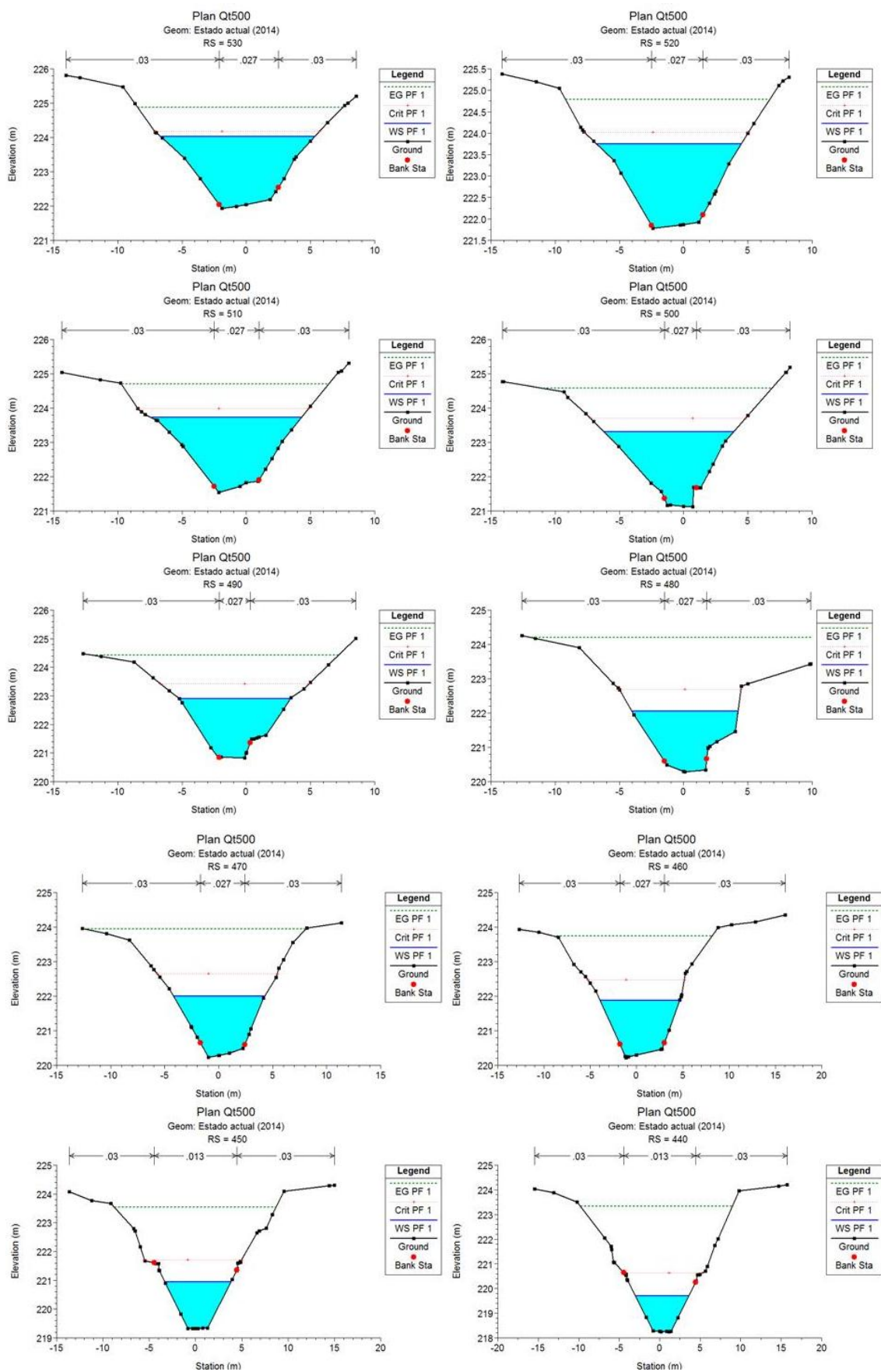
Fig. 20: Perfil longitudinal del tramo de actuación. Obtenido de HEC-RAS

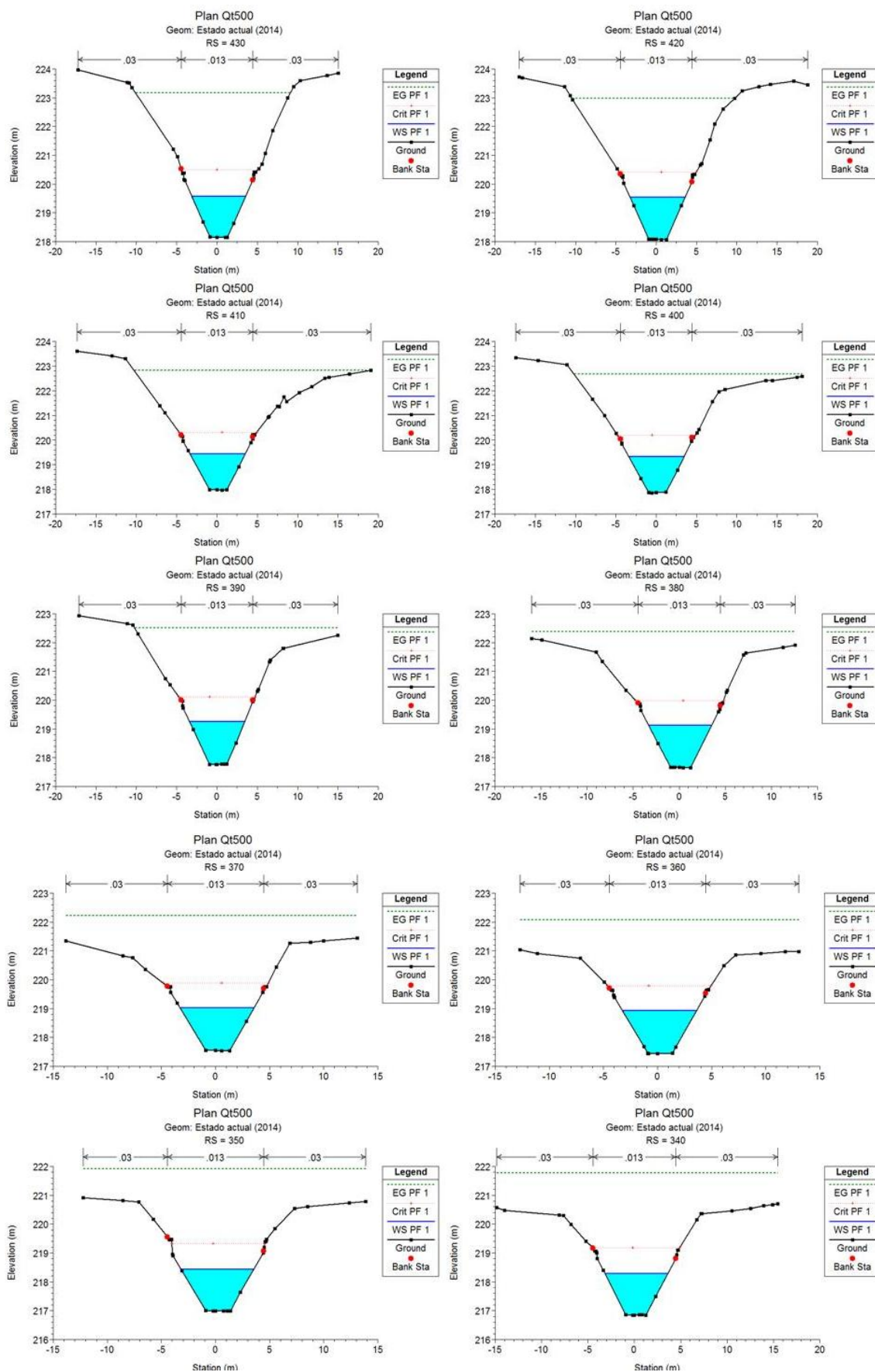
Como se ha visto anteriormente, los perfiles donde se produce desbordamiento son el 180, 200 y 220.

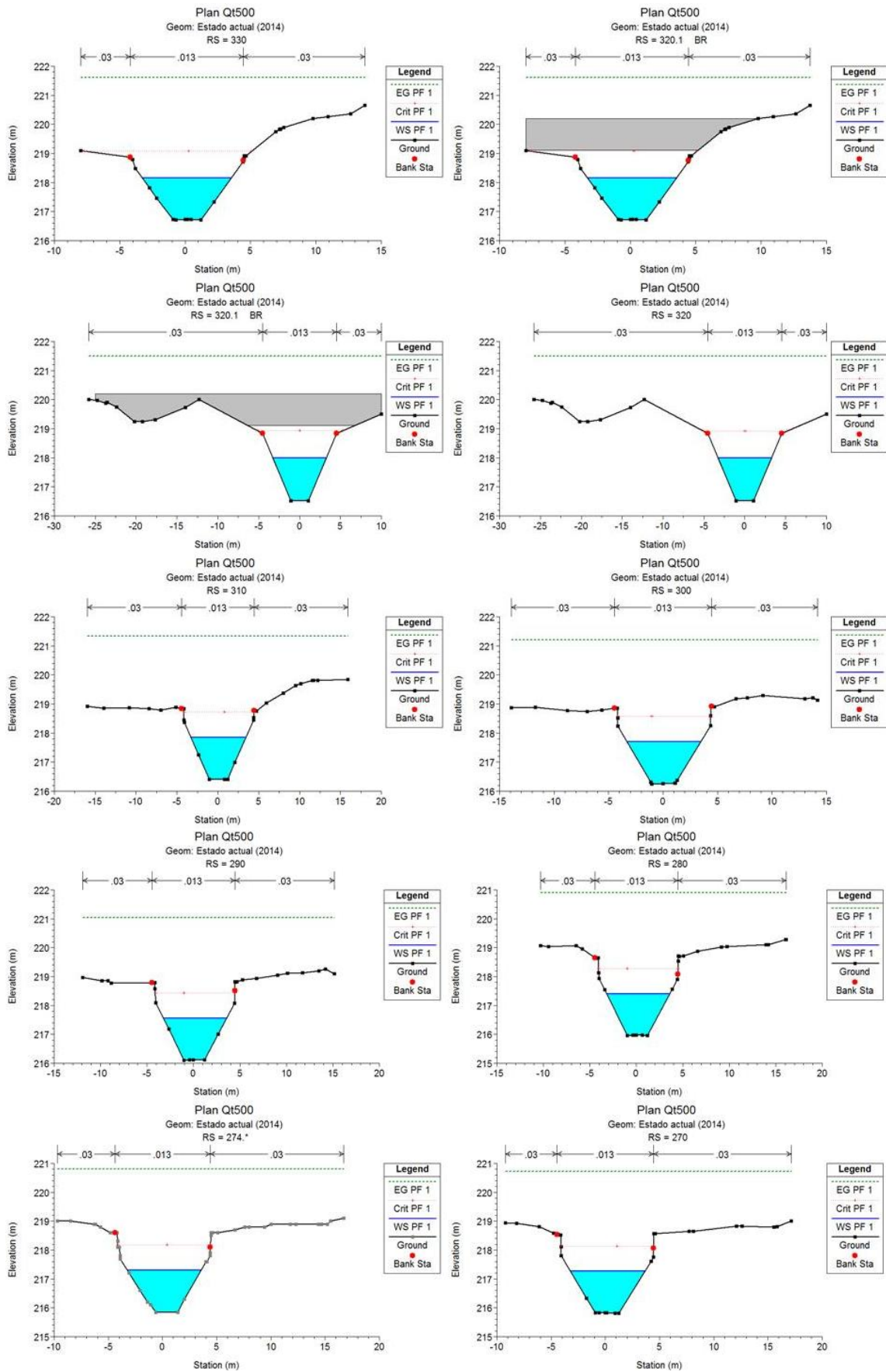
A continuación, se ofrecen los resultados del nivel de cota de lámina de agua, sobre los distintos perfiles del canal para el periodo de retorno de 500 años:

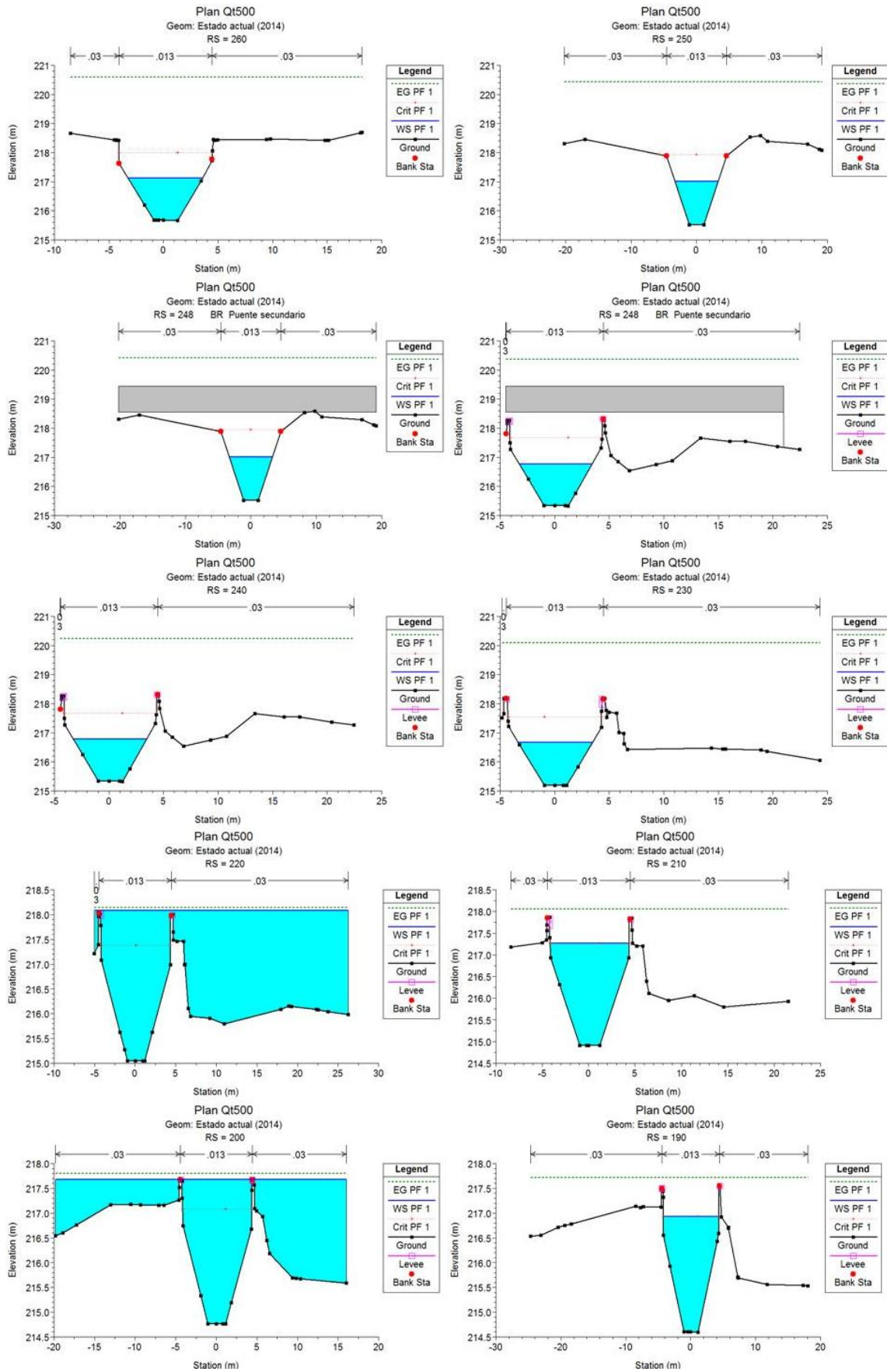


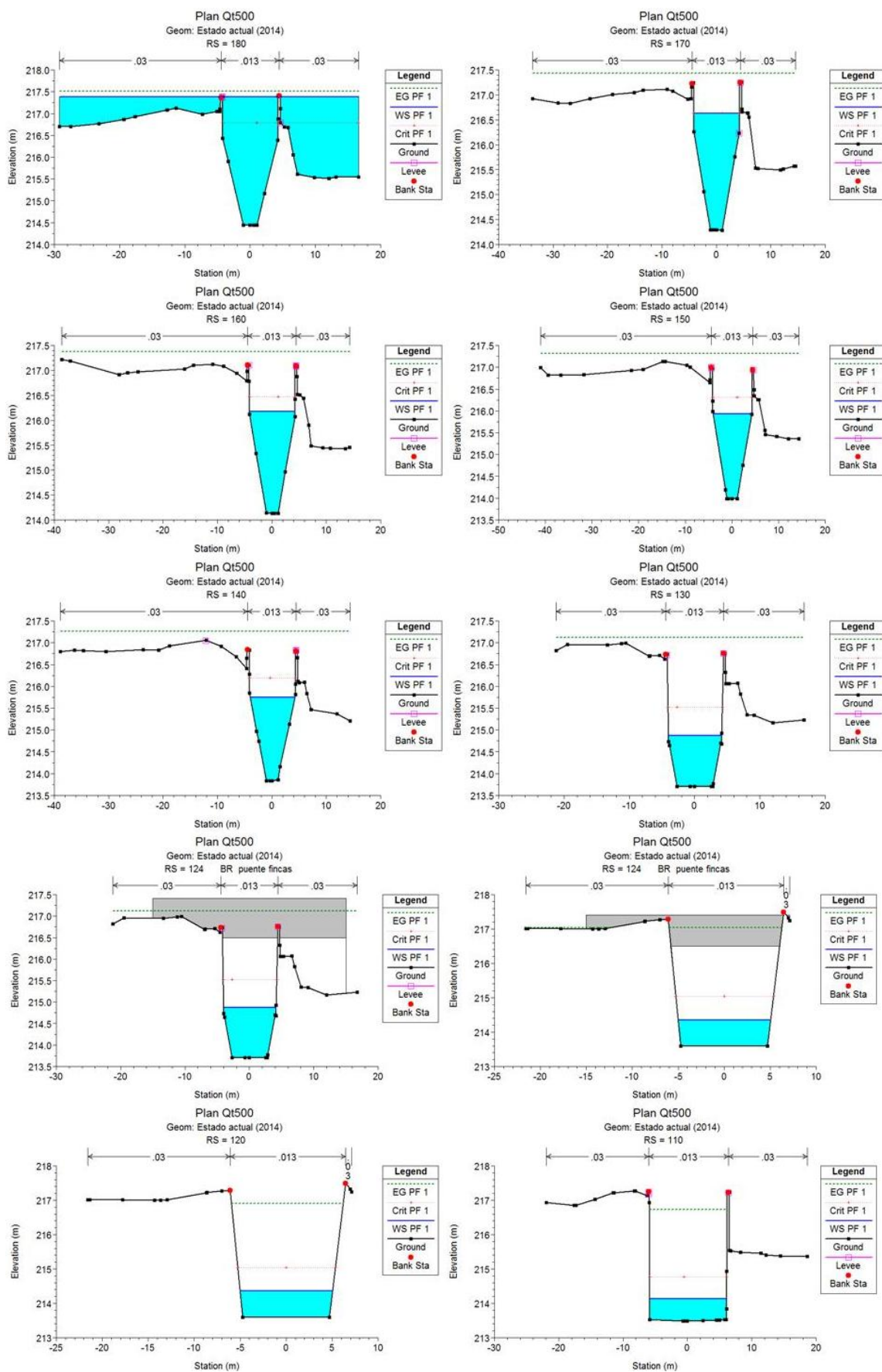












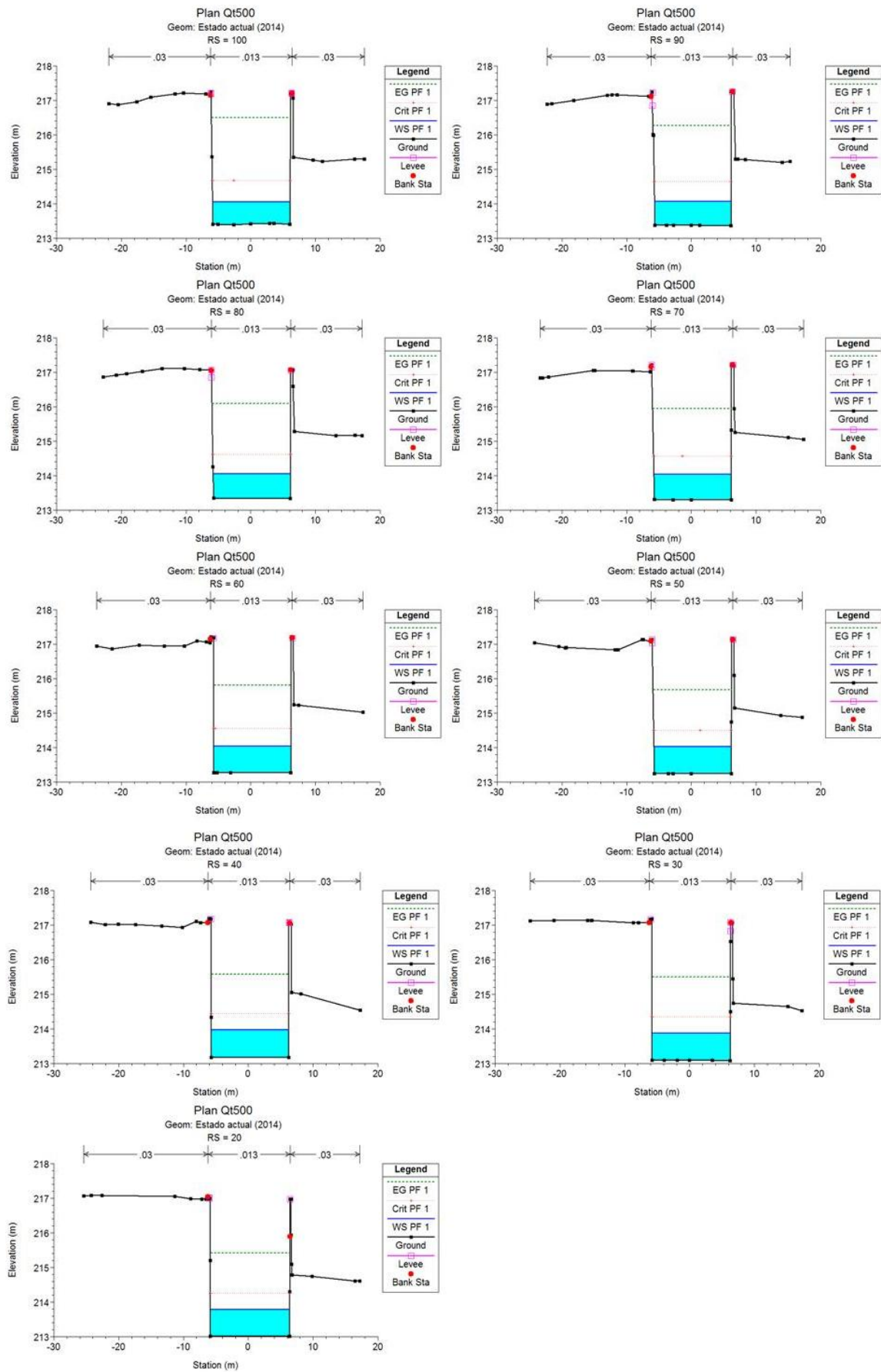


Fig. 21: Perfiles del tramo de estudio con el caudal T500 modelizado. Obtenido de HEC-RAS

Las secciones que dan problemas y no abarcan el caudal asociado al periodo de retorno de 500 años son los perfiles 180, 200 y 220. Estas corresponden a la zona posterior a la curva que desarrolla el canal. Se estudiará el aumento de la capacidad hidráulica en estas secciones conflictivas en el anejo 4: “Propuesta de soluciones técnicas y justificación”.

En la siguiente imagen se muestra señalado en rojo la parte de canal en la que se producen desbordamientos y la zona afectada por las inundaciones. Cabe señalar que toda la zona es llanura de inundación del Río Guadajoz.



Fig. 22: Zona de desbordamiento producido con el caudal T500. Obtenido de Google Earth

5.1. ESTUDIO DE LA ZONA DE LA CURVA DEL CANAL

Como se ha comprobado en este anejo, el caudal se comporta de forma correcta en todas las secciones con excepción del tramo comprendido entre las secciones 220 y 180, correspondiente a la zona posterior a la curva que desarrolla el canal.

Cuando existen curvas en canales, la cota de lámina de agua tiende a elevarse con respecto al nivel medio del agua por efecto de la sobreelevación generada por la fuerza centrífuga en la parte exterior de la curva. Sin embargo, en la parte interior ocurre el efecto contrario, el nivel del agua baja. A este efecto hay que añadir los flujos secundarios que se generan por efecto de estas curvas que, con seguridad, generarán perturbaciones hasta una longitud determinada aguas abajo de ellas.

A continuación se observa con mayor nivel de detalle la curva del canal para ver la sobre elevación de cota de lámina de agua:

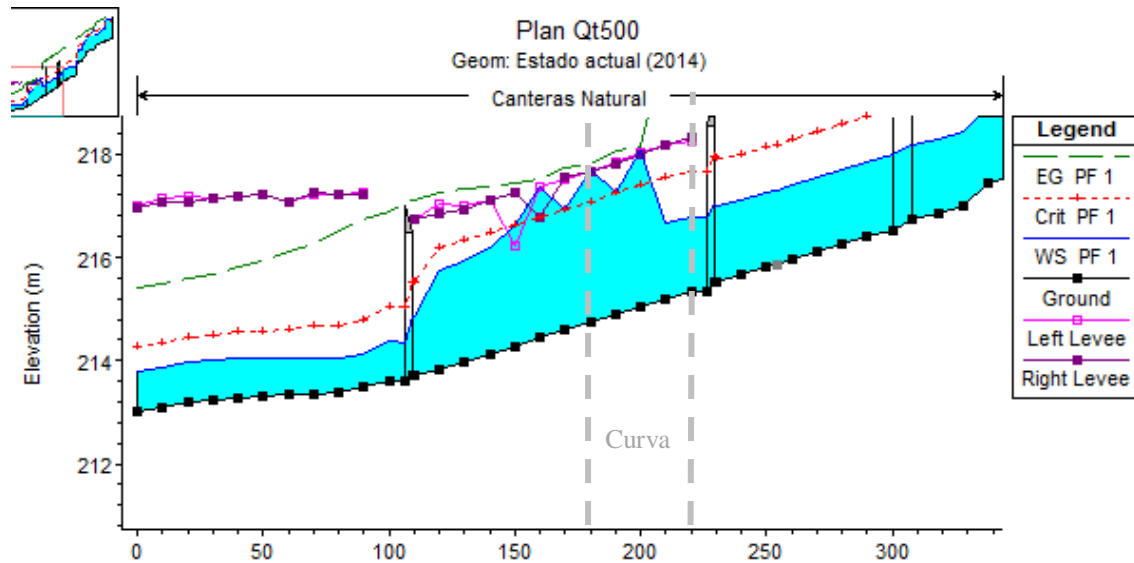


Fig. 23: Detalle de la zona de la curva. Obtenido de HEC-RAS

Para la estimación aproximada de la sobreelevación generada por la curva hay que utilizar la siguiente fórmula propuesta por el U.S. Army Corps of Engineers:

Ecuación 13

$$\Delta y = C \cdot \frac{V^2 \cdot B}{g \cdot R_0}$$

* Δy : sobreelevación con respecto a la superficie libre horizontal. (m)

*C: coeficiente que depende del tipo de régimen de flujo en el canal y la sección transversal del canal

*V: velocidad media en el Canal (m/s)

*B: ancho del Canal (m)

* R_0 : radio de la curva, medido con respecto al eje del Canal. (m)

El efecto de la sobreelevación generada por las curvas en canales es mayor para las condiciones supercríticas del flujo, debido a las mayores velocidades presentes en este tipo de régimen. Esto se queda representado en el valor de “C” según el tipo de régimen para secciones rectangulares o trapezoidales:

C (Régimen subcrítico): 0,5

C (Régimen supercrítico): 1,0

Se sustituyen los valores del canal en la fórmula:

C: 1,0 (adimensional)

V: 8 m/s

B: 5,35 m

R_0 : 50 m

$$\Delta y = 0,7 \text{ metros}$$

Se necesitará cambiar el trazado del canal, tanto el trazado en planta como las secciones y la pendiente para poder solventar el problema y que no se produzcan desbordamientos ni elevadas erosiones.



5. CONCLUSIONES

En conclusión, se puede decir que el tramo de estudio presenta un régimen variable o “mixto”, esto es debido a que está compuesto por 6 zonas con comportamientos diferentes. Estas zonas son: la 1, correspondiente al tramo de arroyo sin canalizar; la 2, la primera parte de canal trapezoidal delimitada por el comienzo de este y la curva; la 3: la zona inmediatamente posterior a la curva; la 4: el último tramo del canal trapezoidal; la 5: el paso de canal trapezoidal a rectangular; finalmente la 6: la zona de canal rectangular.

Observando los gráficos de velocidades y del número de Froude, además de el de la cota de lámina de agua obtenidos de la modelización con HEC-RAS se realizará un resumen del comportamiento de cada una de las secciones modelizadas del tramo de estudio.

El comportamiento hidráulico de cada zona es el siguiente:

1-TRAMO SIN CANALIZAR: Comprendido entre las secciones 660 y 440, se observa un régimen mixto con alternancias de régimen rápido y régimen lento asociado a un tramo naturalizado. Aun siendo el tramo con las velocidades más bajas, estas llegan a superar los 8 m/s, están comprendidas entre los 2,1 y 8,1 m/s.

Con respecto al número de Froude, se obtienen valores situados entre 0,5 y 2,7, es decir, tiene zonas con régimen supercrítico, régimen crítico y régimen subcrítico.

En este tramo no existen problemas de desbordamientos pero hay que proteger el final del tramo frente a la erosión, donde se alcanzan las velocidades de 8 m/s.

2- TRAMO DEL CANAL TRAPEZOIDAL RECTO: Se encuentra entre las secciones 440 y 220. Tiene un régimen uniforme rápido o supercrítico con una velocidad prácticamente constante de unos 8 m/s y un número de Froude de 2,7.

Es una zona muy homogénea que no presenta problemas con respecto a los desbordamientos, se generan unas velocidades muy altas por lo que hay que proteger de forma eficaz frente a la erosión e intentar bajar dichas velocidades.

3- ZONA INMEDIATAMENTE POSTERIOR A LA CURVA: Está localizado al final del tramo trapezoidal, entre las secciones 180 y la 220. En estas secciones la velocidad baja de forma muy brusca, pasando de 8 a 1,7 m/s en un intervalo de 10 metros, con el consiguiente aumento de calado y el inevitable desbordamiento del canal.

El número de Froude baja también de forma brusca tomando valores entre 0,3 y 1,0, alternándose estos cada 10 metros dentro de ese tramo. Es la única zona del canal que pasa por régimen crítico y subcrítico.

Esta es la zona conflictiva del canal por lo que se requiere un redimensionamiento de la geometría.

4- ÚLTIMO TRAMO DE CANAL TRAPEZOIDAL: Situado entre las secciones 180 y 140. Una vez pasada la zona problemática, las velocidades vuelven a aumentar gradualmente hasta 5,2 m/s y el número de Froude pasa de 0,4 a 2,1.



El calado baja y el agua del canal deja de desbordarse pero sigue siendo necesario intentar bajar las velocidades para evitar erosiones problemáticas

5- PASO DE CANAL TRAPEZOIDAL A RECTANGULAR: Está situado entre las secciones 140 y 100. La sección va aumentando por lo que el calado disminuye.

Las velocidades van aumentando de 4,2 a 6,4 m/s y el número de Froude pasa de 2,0 a 2,5, manteniendo el régimen supercrítico. En este tramo hay que igualar los taludes y aumentar la sección para que tenga un aspecto más natural.

6- CANAL RECTANGULAR: Está localizado al final del tramo, entre las secciones 100 y la desembocadura. La pendiente disminuye y la sección es la mayor de todo el tramo de estudio por lo que el calado es también el menor.

Las velocidades van disminuyendo desde 7,0 m/s hasta llegar a la desembocadura con una velocidad de 5,6 m/s. El número de Froude también disminuye, pasando de 2,8 a terminar en 2,1.

En esta zona se debe reforzar el firme para que resista las velocidades adquiridas a la vez que se deben tender los taludes lo máximo posible para que se pueda desarrollar vegetación sobre ellos ya que son totalmente verticales.

Tabla 6: Resultados según zonificación. Elaboración propia

Zona	Secciones	Velocidades (m/s)	nº de Froude	Desbordamiento
1. Tramo sin canalizar	660 - 440	2,1 - 8,1	0,5 - 2,7	No
2. Tramo de canal trapezoidal recto	440 - 220	7,9 - 8,0	2,5 - 2,7	No
3. Tramo inmediatamente posterior a la curva	220 - 180	1,7 - 4,0	0,3 - 1,0	Si
4. Último tramo de canal trapezoidal	180 - 140	2,0 - 5,2	0,4 - 2,1	No
5. Paso de canal trapezoidal a rectangular	140 - 100	4,2 - 6,4	2,0 - 2,5	No
6. Canal rectangular	100 - 0	5,6 - 7,0	1,9 - 2,8	No

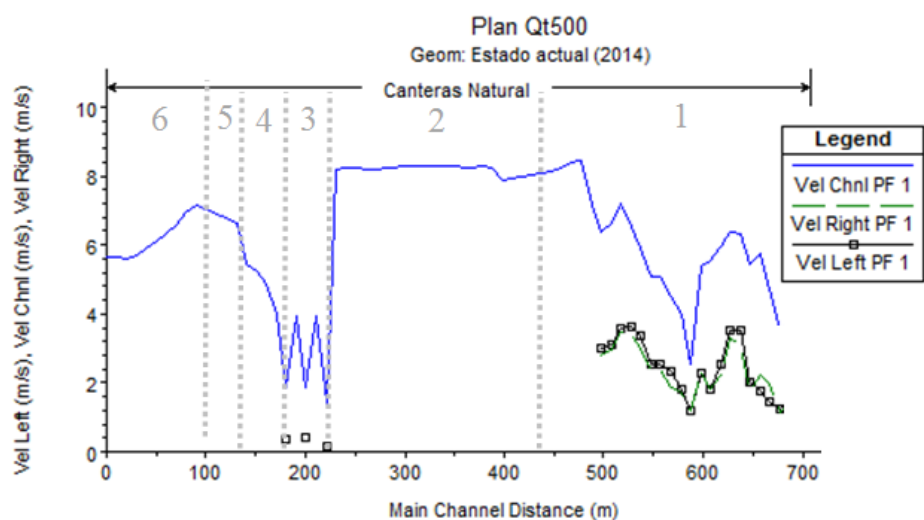


Fig. 24: Gráfico de velocidades para el tramo de estudio. Obtenido de HEC-RAS

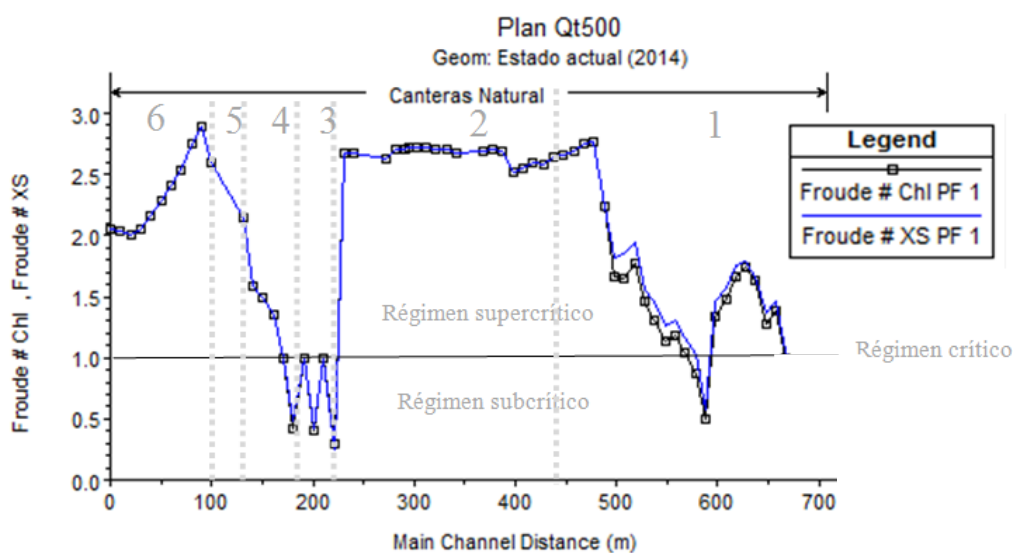


Fig. 25: Gráfico del número de Froude. Obtenido de HEC-RAS

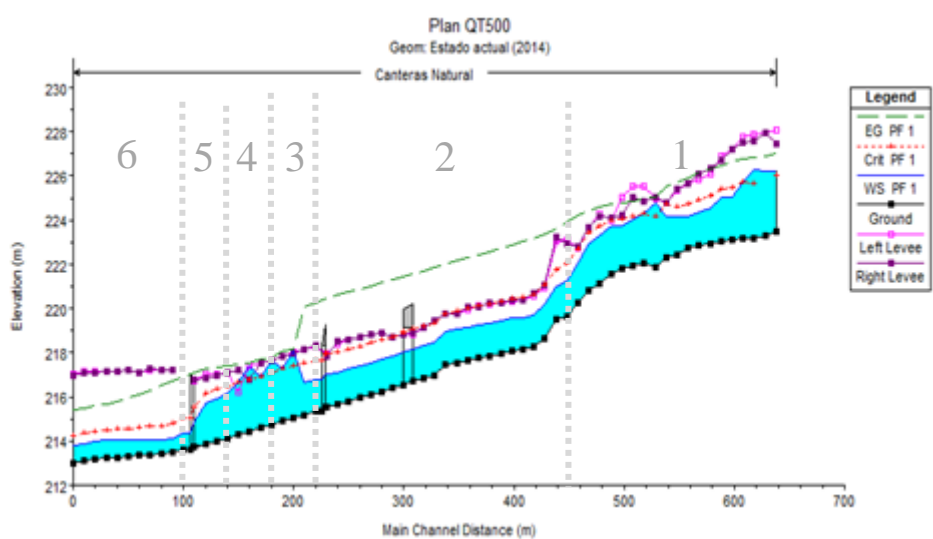
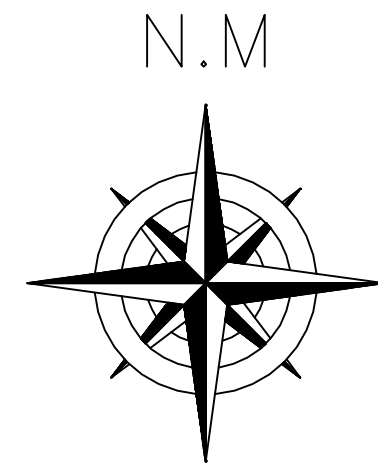


Fig. 26: Perfil longitudinal del tramo de actuación con cota de lámina de agua. Obtenido de HEC-RAS

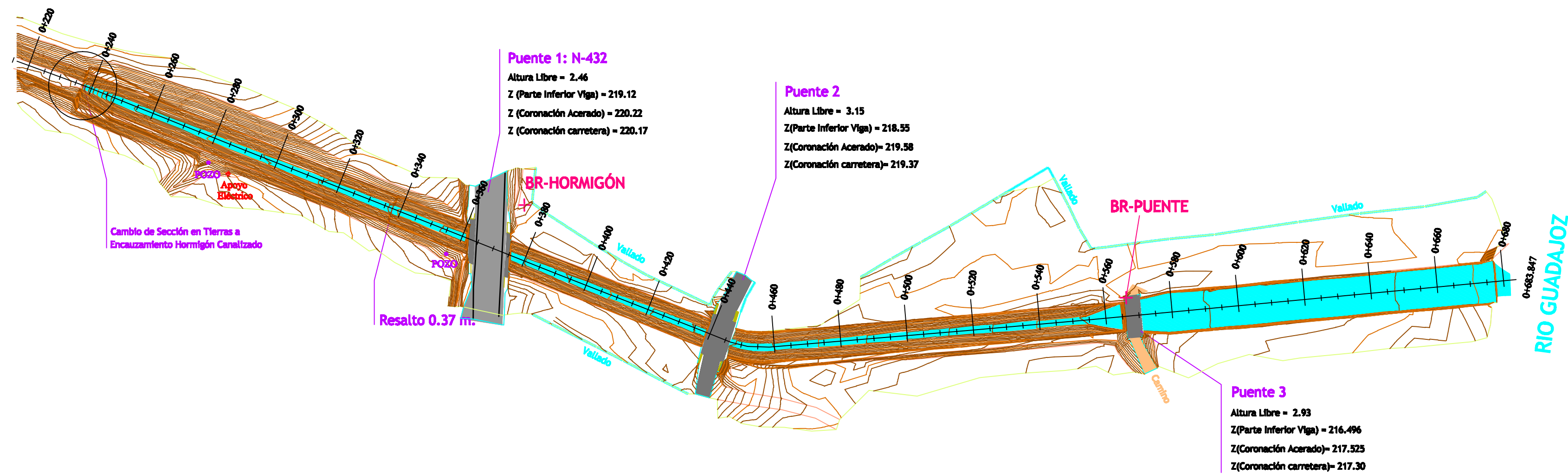


PLANOS



BR-ISLETA

ZONA CANALIZADA

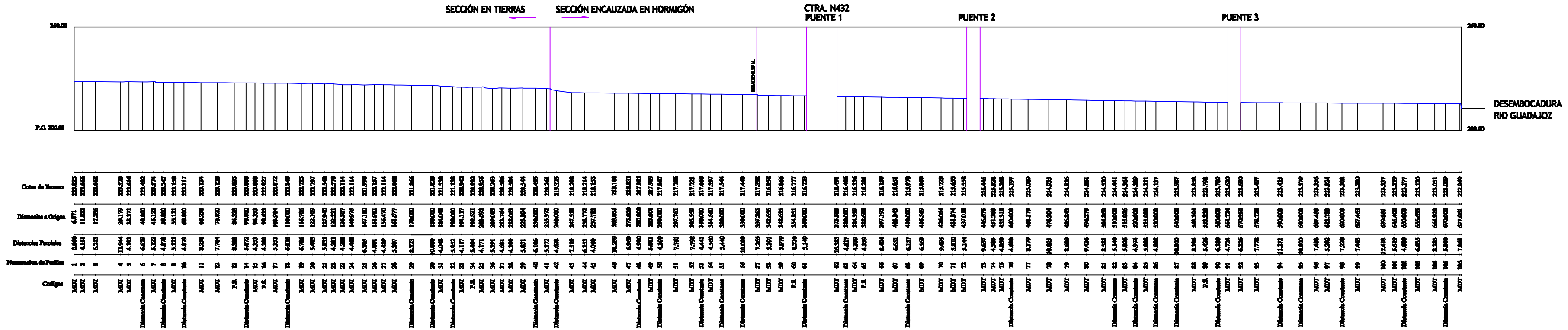


BASES DE TOMA Y PARA REPLANTEO			
BISLETA	X = 369814.050	Y = 4171807.044	Z = 220.023
BHORMIG	X = 369928.715	Y = 4171817.875	Z = 219.465
PUENTE	X = 369956.550	Y = 4171998.750	Z = 217.512

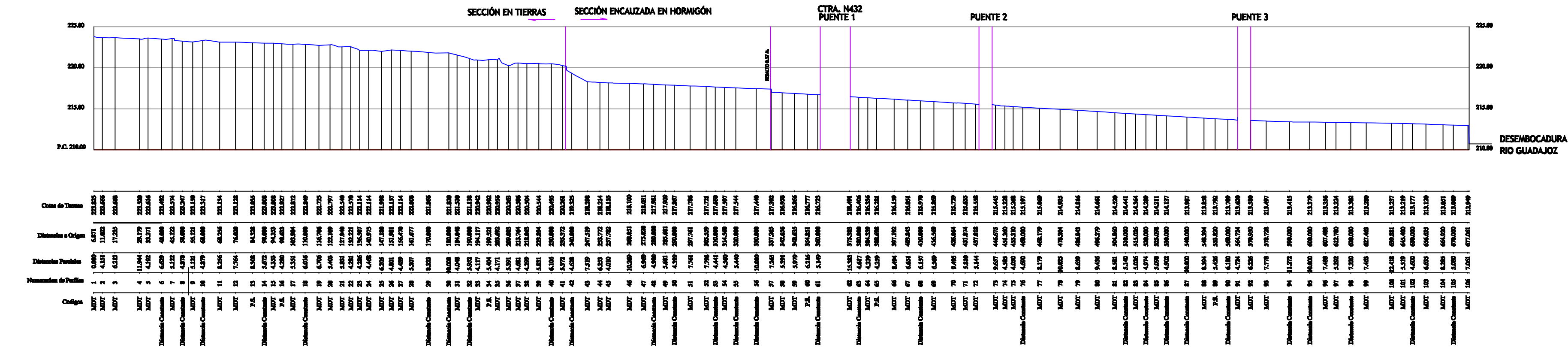
SISTEMA DE REFERENCIA:
Planimetría: Coordenadas UTM ETRS89
Altimetría: Altura ortométrica.

RESTAURACIÓN DEL TRAMO CANALIZADO DEL ARROYO DE LAS CANTERAS (CASTRO DEL RÍO)		 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID ETSI DE MONTES, FORESTAL Y DEL MEDIO NATURAL	FIRMA:
FECHA: Junio 2014	LA INGENIERA DEL MEDIO NATURAL: CRISTINA RODRÍGUEZ COSLADO		
ESCALA: 1:1000	DENOMINACIÓN DEL PLANO: REPRESENTACIÓN EN PLANTA DEL TRAMO CANALIZADO DEL ARROYO DE LAS CANTERAS	Nº DE PLANO 1	

LONGITUDINAL (Eh:1500 Bv:1500)



LONGITUDINAL (Eh:1500 Bv:375)



**DATOS TAQUIMÉTRICOS DEL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO
DE LA ZONA DE ACTUACIÓN.**

Canal Castro del Río. Córdoba

PERFILES TRANSVERSALES

Transversales ArroyoCanteras_Castro			30	7.724	228.111
			30	9.955	228.273
P.K.	Distancia	Cota	30	11.466	228.529
10	-1.235	223.745	40	-25.405	231.653
10	-1.142	223.73	40	-24.517	231.245
10	0	223.687	40	-24.378	231.182
10	1.089	223.646	40	-24.311	231.209
10	2.216	223.828	40	-23.015	230.887
10	3.642	224.069	40	-22.561	230.804
10	6.207	226.878	40	-22.062	230.786
10	11.304	228.987	40	-18.961	228.298
10	12.063	229.069	40	-18.48	227.95
10	12.295	229.088	40	-17.904	227.846
20	-4.96	227.337	40	-13.967	227.576
20	-2.059	223.78	40	-11.646	227.781
20	-0.582	223.704	40	-9.86	227.836
20	0	223.634	40	-5.79	227.905
20	0.772	223.541	40	-5.521	227.909
20	1.007	223.55	40	-5.207	227.445
20	2.145	223.777	40	-2.242	223.362
20	6.833	228.057	40	-1.371	223.326
20	7.185	228.366	40	-0.753	223.355
20	10.031	228.636	40	0	223.492
20	11.574	228.784	40	0.401	223.564
30	-22.913	231.051	40	0.704	223.719
30	-21.343	229.67	40	1.756	223.736
30	-19.377	228.002	40	1.967	224.345
30	-17.342	227.809	40	4.346	226.787
30	-16.418	227.741	40	6.608	227.933
30	-14.761	227.779	40	7.533	228.044
30	-12.78	227.932	40	9.709	228.275
30	-10.552	228.046	40	11.695	228.612
30	-6.381	228.045	50	-24.422	231.27
30	-5.732	228.065	50	-24.388	231.274
30	-5.428	228.071	50	-23.576	230.978
30	-4.875	227.214	50	-23.246	230.851
30	-2.631	223.801	50	-23.193	230.824
30	-2.202	223.737	50	-21.843	230.555
30	-0.151	223.458	50	-21.341	230.477
30	0	223.463	50	-18.184	228.289
30	0.492	223.479	50	-17.595	227.839
30	0.921	223.524	50	-17.185	227.771
30	1.034	223.728	50	-16.887	227.779
30	3.968	226.487	50	-16.056	227.822
30	5.521	227.391	50	-10.126	227.657

50	-6.281	227.749	70	-19.816	229.819
50	-5.119	227.79	70	-18.073	228.174
50	-4.201	226.614	70	-17.279	227.562
50	-1.894	223.384	70	-15.726	227.262
50	-0.933	223.182	70	-11.958	227.077
50	-0.302	223.21	70	-10.759	226.978
50	0	223.247	70	-9.795	227.024
50	1.562	223.439	70	-8.987	227.052
50	2.051	223.457	70	-5.289	227.232
50	3.771	226.278	70	-2.756	223.487
50	4.808	227.594	70	-2.738	223.463
50	7.559	228.111	70	-1.587	223.426
50	7.82	228.142	70	-1.429	223.4
50	8.476	228.214	70	-1.251	223.385
50	11.726	228.554	70	0	223.132
60	-23.69	230.918	70	0.143	223.103
60	-22.654	230.548	70	1.692	223.193
60	-22.605	230.528	70	1.867	223.194
60	-22.483	230.506	70	2.201	223.62
60	-20.884	230.25	70	4.439	227.174
60	-20.843	230.211	70	7.219	227.432
60	-17.498	227.634	70	7.413	227.46
60	-17.471	227.629	70	10.132	227.702
60	-17.409	227.626	70	12.176	228.212
60	-13.066	227.269	80	-22.413	230.23
60	-9.391	227.46	80	-22.054	230.086
60	-6.181	227.579	80	-21.263	229.792
60	-5.361	227.622	80	-19.972	229.472
60	-4.817	226.819	80	-18.943	229.281
60	-3.561	225.741	80	-16.914	227.802
60	-1.874	223.573	80	-16.514	227.422
60	-0.71	223.467	80	-16.186	227.359
60	0	223.317	80	-15.333	227.315
60	0.461	223.22	80	-10.654	226.594
60	1.379	223.239	80	-8.288	226.69
60	2.065	223.189	80	-7.293	226.743
60	2.607	224.094	80	-6.693	226.767
60	4.101	227.323	80	-5.16	226.904
60	6.526	227.749	80	-3.51	224.831
60	7.99	228.006	80	-2.446	223.418
60	8.211	228.057	80	-2.014	223.306
60	11.24	228.393	80	-1.141	223.162
60	11.389	228.401	80	-0.199	223.078
70	-22.964	230.591	80	0	223.091
70	-22.649	230.478	80	0.297	223.109
70	-22.005	230.214	80	1.667	223.116
70	-20.345	229.905	80	2.062	223.17

80	4.029	225.901	100	-13.547	226.116
80	4.628	226.652	100	-9.384	225.69
80	8.215	227.037	100	-8.543	225.659
80	10.214	227.622	100	-5.406	225.783
80	11.938	227.874	100	-5.01	225.792
80	12.379	227.913	100	-4.871	225.588
80	12.711	227.996	100	-2.934	223.314
90	-23.557	229.751	100	-1.528	223.004
90	-23.287	229.654	100	-1.28	222.941
90	-22.316	229.373	100	-1.011	222.958
90	-20.945	229.002	100	0	222.905
90	-20.235	228.834	100	0.807	222.863
90	-18.507	227.765	100	1.107	222.905
90	-17.921	227.368	100	3.564	223.271
90	-16.872	227.153	100	4.388	223.931
90	-15.769	226.991	100	6.971	226.062
90	-12.244	226.361	100	9.827	226.626
90	-10.956	226.144	100	11.482	227.241
90	-6.449	226.07	100	11.906	227.311
90	-5.792	226.098	110	-26.687	229.031
90	-5.393	226.149	110	-25.566	228.71
90	-3.929	223.912	110	-25.442	228.67
90	-3.554	223.421	110	-25.108	228.62
90	-1.654	222.932	110	-23.307	228.223
90	-1.577	222.919	110	-23.073	228.036
90	-1.493	222.912	110	-22.06	227.237
90	0	223.008	110	-20.213	226.896
90	0.546	223.043	110	-15.662	226.035
90	0.764	223.045	110	-14.372	225.803
90	2.466	223.274	110	-13.877	225.734
90	2.958	223.961	110	-8.684	225.312
90	4.319	225.895	110	-8.158	225.297
90	4.674	226.318	110	-5.423	225.486
90	7.121	226.576	110	-5.176	225.496
90	9.267	226.84	110	-4.312	225.522
90	9.813	226.966	110	-3.933	224.88
90	12.548	227.526	110	-2.705	223.115
100	-25.194	229.412	110	-1.334	222.994
100	-25.15	229.401	110	-0.191	222.864
100	-24.531	229.229	110	0	222.849
100	-23.935	229.059	110	0.595	222.802
100	-23.165	228.894	110	1.197	222.746
100	-21.945	228.563	110	2.42	222.83
100	-21.291	228.052	110	3.57	222.784
100	-20.534	227.482	110	5.188	224.41
100	-19.622	227.302	110	5.948	225.609
100	-15.2	226.366	110	-6.896	225.773

110	7.49	225.885	130	-26.667	227.721
110	9.669	227.177	130	-25	227.212
110	10.119	227.359	130	-23.299	227.027
110	12.335	227.568	130	-23.253	227.023
110	12.439	227.586	130	-23.216	227.019
120	-28.805	228.656	130	-19.156	226.46
120	-28	228.413	130	-18.146	226.145
120	-27.828	228.381	130	-14.68	225.451
120	-27.568	228.369	130	-13.312	225.158
120	-25.241	228.019	130	-13.068	225.126
120	-25.115	227.97	130	-7.708	224.445
120	-23.657	227.338	130	-7.012	224.54
120	-23.247	227.156	130	-4.36	224.347
120	-22.784	227.066	130	-4.219	224.323
120	-19.018	226.357	130	-3.8	223.911
120	-17.644	226.139	130	-2.377	222.758
120	-17.21	226.065	130	-1.407	222.627
120	-13.698	225.575	130	-0.051	222.574
120	-12.177	225.321	130	0	222.565
120	-10.251	225.212	130	0.63	222.457
120	-6.883	225.129	130	1.255	222.376
120	-5.773	225.158	130	1.595	222.428
120	-4.153	225.228	130	1.971	222.326
120	-3.088	223.969	130	2.463	222.314
120	-2.254	222.831	130	3.789	223.442
120	-1.95	222.798	130	4.913	224.272
120	-1.711	222.779	130	5.269	224.283
120	0	222.769	130	7.235	224.649
120	0.765	222.764	130	9.231	224.963
120	1.556	222.463	130	9.619	225.026
120	2.042	222.449	130	10.612	225.078
120	2.843	222.418	130	13.032	225.228
120	4.534	223.867	130	13.625	225.342
120	6.124	225.064	130	13.764	225.393
120	6.983	225.432	130	14.698	225.843
120	7.675	225.521	130	15.513	226.134
120	8.842	225.851	140	-18.488	226.791
120	10.232	226.464	140	-14.926	226.681
120	11.716	227.164	140	-13.811	226.622
120	12.399	227.274	140	-9.717	224.949
120	13.117	227.335	140	-7.838	224.084
130	-31.656	228.279	140	-6.485	223.891
130	-30.477	228.072	140	-4.602	223.441
130	-30.224	228.007	140	-3.718	222.991
130	-27.449	227.899	140	-1.337	222.274
130	-27.343	227.894	140	0	222.114
130	27.292	227.88	140	1.064	221.986

140	2.156	221.882	160	7.919	225
140	3.5	222.674	160	8.545	225.206
140	4.213	223.286	170	-14.15	225.38
140	4.323	223.308	170	-11.457	225.192
140	4.584	223.364	170	-9.682	225.048
140	4.823	223.397	170	-8.004	224.135
140	5.042	223.413	170	-7.885	224.073
140	9.389	225.006	170	-7.773	224.033
140	11.13	225.331	170	-5.426	223.361
140	11.923	225.47	170	-4.886	223.07
140	14.239	225.936	170	-2.375	221.779
150	-14.718	226.294	170	-0.267	221.854
150	-11.229	226.088	170	0	221.866
150	-10.363	226.035	170	1.19	221.923
150	-9.162	225.525	170	1.55	222.119
150	-6.521	224.086	170	2.408	222.586
150	-5.72	223.874	170	3.511	223.28
150	-4.482	223.505	170	5.466	224.228
150	-1.693	222.1	170	7.419	225.115
150	-1.584	222.043	170	7.743	225.214
150	-1.457	222.032	170	8.209	225.305
150	0	222.092	180	-14.352	225.042
150	2.26	222.186	180	-11.356	224.824
150	3.009	222.828	180	-9.763	224.726
150	3.866	223.452	180	-8.46	223.99
150	6.461	224.345	180	-8.153	223.887
150	7.681	224.819	180	-7.867	223.815
150	8.545	225.141	180	-6.888	223.633
150	8.905	225.23	180	-6.011	223.304
160	-14.021	225.814	180	-5.024	222.937
160	-12.963	225.75	180	-4.91	222.877
160	-9.596	225.478	180	-2.124	221.539
160	-8.674	224.982	180	-0.485	221.716
160	-7.074	224.155	180	-0.014	221.819
160	-6.536	223.991	180	0	221.82
160	-4.805	223.396	180	0.94	221.862
160	-3.566	222.795	180	2.489	222.83
160	-1.886	221.927	180	2.808	223.032
160	-0.769	221.982	180	3.504	223.37
160	0	222.042	180	7.17	225.034
160	1.85	222.186	180	7.396	225.078
160	2.285	222.413	180	7.973	225.305
160	2.957	222.795	190	-14.082	224.773
160	3.748	223.371	190	-14.016	224.768
160	3.885	223.432	190	-9.312	224.476
160	6.33	224.438	190	-9.028	224.315
160	7.648	224.933	190	-7.61	223.838

190	-5.042	222.872	210	4.473	222.79
190	-2.519	221.816	210	9.82	223.421
190	-1.752	221.571	210	9.872	223.43
190	-1.259	221.156	210	9.882	223.433
190	-1.033	221.17	220	-12.62	224.183
190	0	221.138	220	-10.389	224.038
190	0.723	221.116	220	-8.242	223.857
190	0.773	221.683	220	-6.26	223.112
190	1.334	221.671	220	-5.458	222.782
190	2.3	222.364	220	-4.585	222.443
190	3.025	222.889	220	-2.544	221.355
190	3.262	223.039	220	-0.965	220.455
190	7.944	225.047	220	0	220.508
190	7.975	225.041	220	0.059	220.511
190	8.276	225.188	220	0.978	220.586
200	-12.677	224.47	220	2.259	220.713
200	-11.276	224.382	220	2.793	221.127
200	-8.724	224.182	220	4.135	222.175
200	-7.273	223.635	220	5.331	222.774
200	-5.21	222.895	220	5.596	223.047
200	-2.737	221.183	220	6.856	223.778
200	-2.171	220.841	220	8.163	224.209
200	-1.973	220.855	220	11.374	224.348
200	-0.139	220.821	230	-12.696	224.133
200	0	220.997	230	-10.576	224.045
200	0.013	221.014	230	-8.463	223.908
200	0.401	221.486	230	-6.761	223.117
200	0.602	221.498	230	-5.503	222.764
200	1.519	221.621	230	-4.391	222.35
200	2.913	222.528	230	-1.219	220.461
200	3.49	222.932	230	-1.154	220.422
200	4.479	223.24	230	-0.856	220.442
200	6.387	224.092	230	0	220.495
200	8.541	225.004	230	2.664	220.659
210	-12.59	224.255	230	2.764	220.677
210	-11.534	224.173	230	4.69	222.094
210	-8.103	223.901	230	4.821	222.191
210	-5.482	222.868	230	4.885	222.247
210	-5.091	222.734	230	5.294	222.857
210	-3.861	221.95	230	5.437	222.919
210	-1.306	220.482	230	8.816	224.18
210	0	220.297	230	10.262	224.266
210	0.078	220.286	230	12.828	224.352
210	1.714	220.341	230	16.084	224.549
210	1.883	220.979	240	-13.651	224.077
210	2.563	221.162	240	-11.227	223.767
210	4.003	221.46	240	-9.156	223.677

240	-6.687	222.788	250	2.252	218.805
240	-6.531	222.717	250	4.507	220.279
240	-5.966	222.156	250	4.519	220.311
240	-5.489	221.677	250	4.66	220.55
240	-4.46	221.604	250	4.836	220.547
240	-4.242	221.577	250	4.852	220.549
240	-4.006	221.577	250	4.949	220.574
240	-3.938	221.357	250	5.642	220.707
240	-3.251	220.9	250	5.866	220.897
240	-0.811	219.319	250	6.783	221.74
240	-0.349	219.323	250	7.222	222.011
240	0	219.325	250	9.788	223.953
240	0.29	219.327	250	14.691	224.154
240	0.793	219.337	250	15.749	224.211
240	1.299	219.345	260	-17.258	223.966
240	3.981	221.033	260	-11.149	223.523
240	4.53	221.398	260	-10.896	223.508
240	4.59	221.602	260	-10.519	223.344
240	4.839	221.621	260	-5.439	221.204
240	4.851	221.621	260	-4.921	220.954
240	4.891	221.66	260	-4.281	220.377
240	6.628	222.646	260	-4.238	220.375
240	6.91	222.715	260	-4.12	220.376
240	7.663	222.81	260	-4.068	220.164
240	8.296	223.289	260	-1.729	218.683
240	9.552	224.093	260	-0.888	218.155
240	14.45	224.288	260	0	218.14
240	15.021	224.304	260	0.017	218.14
250	-15.421	224.043	260	1.05	218.153
250	-13.112	223.875	260	1.195	218.149
250	-10.217	223.507	260	1.296	218.15
250	-6.802	222.053	260	2.069	218.637
250	-5.979	221.711	260	4.529	220.188
250	-5.922	221.584	260	4.577	220.317
250	-5.703	221.073	260	4.601	220.412
250	-5.577	221.048	260	4.67	220.417
250	-4.265	220.584	260	4.782	220.424
250	-4.17	220.581	260	5.195	220.534
250	-4.125	220.535	260	5.562	220.696
250	-4.06	220.361	260	5.991	221.067
250	-1.673	218.825	260	6.931	221.858
250	-0.815	218.284	260	8.747	222.991
250	0	218.26	260	9.516	223.383
250	0.172	218.255	260	10.305	223.595
250	0.885	218.258	260	13.688	223.776
250	1.128	218.254	260	15.067	223.86
250	1.383	218.258	270	-16.997	223.722

270	-16.605	223.693	280	0.661	217.974
270	-11.359	223.382	280	1.206	217.983
270	-10.655	223.077	280	2.736	218.918
270	-10.352	222.933	280	4.439	220.05
270	-4.828	220.528	280	4.463	220.224
270	-4.299	220.289	280	4.61	220.218
270	-4.194	220.283	280	4.69	220.21
270	-4.172	220.28	280	6.315	220.91
270	-4.157	220.237	280	6.465	220.963
270	-4.047	220.033	280	7.475	221.365
270	-2.743	219.246	280	7.7	221.343
270	-0.898	218.088	280	8.322	221.75
270	-0.597	218.083	280	8.642	221.56
270	-0.254	218.088	280	10.224	221.921
270	0	218.081	280	11.765	222.169
270	0.627	218.065	280	13.375	222.499
270	1.245	218.071	280	13.894	222.55
270	3.106	219.245	280	16.406	222.68
270	4.458	220.08	280	19.084	222.836
270	4.499	220.243	290	-17.379	223.335
270	4.511	220.326	290	-14.664	223.227
270	4.706	220.338	290	-11.045	223.06
270	4.776	220.335	290	-7.886	221.659
270	5.491	220.656	290	-6.412	220.987
270	5.664	220.715	290	-4.959	220.265
270	6.661	221.543	290	-4.477	220.047
270	7.282	222.082	290	-4.456	220.044
270	8.317	222.607	290	-4.33	220.05
270	9.75	222.983	290	-4.273	219.873
270	10.681	223.233	290	-4.259	219.832
270	12.762	223.381	290	-1.877	218.43
270	14.16	223.462	290	-0.926	217.862
270	17.061	223.583	290	-0.515	217.858
270	18.809	223.448	290	0	217.867
280	-17.348	223.608	290	1.184	217.887
280	-13.004	223.406	290	2.643	218.777
280	-11.337	223.307	290	4.401	219.949
280	-7.103	221.39	290	4.417	220.112
280	-6.461	221.11	290	4.572	220.097
280	-4.361	220.16	290	4.616	220.107
280	-4.349	220.16	290	5.068	220.29
280	-4.26	220.148	290	5.281	220.415
280	-4.201	219.975	290	6.996	221.554
280	-4.189	219.952	290	7.789	221.961
280	-3.549	219.566	290	8.502	222.043
280	-0.912	217.991	290	8.554	222.049
280	0	217.981	290	13.578	222.403

290	14.393	222.414	310	0.445	217.647
290	17.492	222.545	310	1.256	217.648
290	18.105	222.589	310	4.269	219.587
300	-17.099	222.94	310	4.387	219.669
300	-11.099	222.667	310	4.481	219.864
300	-10.416	222.617	310	4.682	219.888
300	-9.772	222.31	310	4.707	219.903
300	-6.4	220.742	310	5.104	220.274
300	-5.804	220.542	310	5.202	220.342
300	-4.42	219.98	310	7.003	221.578
300	-4.366	219.982	310	7.253	221.641
300	-4.271	219.975	310	11.251	221.825
300	-4.237	219.798	310	12.604	221.916
300	-4.213	219.721	320	-13.83	221.344
300	-2.953	218.978	320	-8.563	220.82
300	-0.914	217.757	320	-7.663	220.755
300	-0.124	217.764	320	-6.472	220.363
300	0	217.767	320	-4.317	219.741
300	0.577	217.782	320	-4.184	219.756
300	0.917	217.773	320	-4.16	219.752
300	1.221	217.773	320	-4.139	219.559
300	2.351	218.5	320	-3.544	219.189
300	4.42	219.955	320	-0.899	217.556
300	4.438	219.994	320	0	217.544
300	4.531	220.014	320	0.551	217.536
300	4.571	220.019	320	1.307	217.54
300	5.039	220.3	320	2.841	218.556
300	5.112	220.369	320	4.378	219.556
300	6.496	221.322	320	4.446	219.677
300	6.602	221.394	320	4.479	219.748
300	8.18	221.795	320	4.553	219.757
300	8.249	221.798	320	4.705	219.761
300	15.014	222.25	320	5.631	220.439
310	-16.019	222.143	320	6.865	221.263
310	-14.921	222.093	320	8.757	221.292
310	-9.015	221.665	320	9.966	221.353
310	-8.335	221.34	320	13.118	221.45
310	-5.769	220.339	330	-12.717	221.039
310	-4.359	219.873	330	-11.106	220.906
310	-4.279	219.867	330	-7.113	220.748
310	-4.204	219.79	330	-4.933	219.927
310	-4.175	219.64	330	-4.273	219.638
310	-2.305	218.493	330	-4.25	219.637
310	-0.922	217.664	330	-4.15	219.621
310	-0.678	217.667	330	-4.074	219.462
310	-0.461	217.672	330	-4.031	219.411
310	0	217.66	330	-3.989	219.379

330	-1.247	217.681	350	-6.821	219.99
330	-0.894	217.462	350	-5.224	219.409
330	-0.851	217.436	350	-4.555	219.218
330	-0.828	217.436	350	-4.238	219.065
330	0	217.44	350	-4.105	219.056
330	1.374	217.447	350	-4.091	219.056
330	1.69	217.657	350	-4.079	219.008
330	4.362	219.435	350	-4.02	218.807
330	4.459	219.533	350	-3.373	218.398
330	4.522	219.646	350	-0.916	216.853
330	4.665	219.65	350	-0.154	216.848
330	4.722	219.657	350	0	216.85
330	6.12	220.493	350	0.548	216.856
330	7.214	220.858	350	0.859	216.852
330	9.546	220.904	350	1.262	216.851
330	11.803	220.971	350	2.307	217.494
330	13.06	220.981	350	4.528	218.854
340	-12.219	220.915	350	4.568	218.931
340	-8.562	220.824	350	4.67	219.1
340	-7.097	220.765	350	4.71	219.099
340	-5.728	220.168	350	6.737	220.154
340	-4.264	219.464	350	7.175	220.367
340	-4.238	219.462	350	7.305	220.361
340	-4.085	219.463	350	10.51	220.465
340	-3.956	218.948	350	12.525	220.546
340	-3.946	218.91	350	13.94	220.641
340	-3.102	218.377	350	14.922	220.671
340	-0.892	217.001	350	15.442	220.7
340	-0.205	216.986	360	-4.201	218.865
340	0	216.988	360	-4.15	218.834
340	0.734	216.996	360	-4.003	218.794
340	1.096	216.993	360	-3.793	218.489
340	1.386	216.997	360	-2.74	217.822
340	2.306	217.635	360	-2.174	217.458
340	4.428	219.006	360	-0.94	216.723
340	4.58	219.392	360	-0.716	216.719
340	4.685	219.406	360	0	216.723
340	4.729	219.478	360	0.171	216.725
340	5.505	219.841	360	0.458	216.724
340	7.296	220.541	360	1.214	216.719
340	8.527	220.606	360	2.211	217.332
340	12.37	220.74	360	4.425	218.705
340	13.878	220.791	360	4.481	218.821
350	-14.871	220.567	360	4.528	218.912
350	-13.998	220.482	360	4.575	218.911
350	-8.069	220.321	360	4.655	218.921
350	-7.627	220.305	360	6.931	219.753

360	7.209	219.824	380	11.7	219.816
360	7.245	219.83	380	12.217	219.818
360	7.297	219.844	380	15.903	219.848
360	7.559	219.892	390	-13.919	218.876
360	9.794	220.197	390	-11.703	218.883
360	10.937	220.272	390	-8.783	218.778
360	12.675	220.362	390	-6.949	218.74
360	13.744	220.658	390	-5.636	218.79
370	-25.816	220.001	390	-4.422	218.856
370	-24.748	219.967	390	-4.29	218.855
370	-23.705	219.868	390	-4.203	218.862
370	-23.533	219.913	390	-4.15	218.507
370	-22.42	219.744	390	-4.137	218.243
370	-20.183	219.242	390	-1.117	216.307
370	-19.239	219.249	390	-1.023	216.245
370	-17.686	219.314	390	0	216.261
370	-13.991	219.736	390	1.094	216.278
370	-12.299	220.006	390	1.135	216.278
370	0	220.006	390	1.293	216.374
380	-15.992	218.914	390	4.364	218.252
380	-13.965	218.854	390	4.387	218.597
380	-10.846	218.872	390	4.429	218.916
380	-8.424	218.83	390	4.624	218.901
380	-6.972	218.785	390	4.725	218.907
380	-5.148	218.885	390	6.713	219.18
380	-4.356	218.825	390	7.735	219.212
380	-4.281	218.822	390	9.164	219.292
380	-4.152	218.833	390	13.017	219.181
380	-4.133	218.444	390	13.727	219.21
380	-4.095	218.373	390	14.16	219.132
380	-2.338	217.245	400	-11.938	218.973
380	-1.016	216.407	400	-9.871	218.849
380	0	216.406	400	-9.19	218.853
380	0.822	216.406	400	-8.852	218.78
380	0.995	216.409	400	-4.421	218.783
380	1.187	216.412	400	-4.347	218.789
380	2.102	216.982	400	-4.17	218.788
380	4.376	218.446	400	-4.143	218.575
380	4.396	218.53	400	-4.074	218.097
380	4.428	218.779	400	-2.658	217.177
380	4.561	218.766	400	-1.006	216.103
380	4.706	218.753	400	-0.427	216.112
380	5.942	219.04	400	0	216.113
380	8.04	219.379	400	1.191	216.117
380	9.525	219.632	400	2.64	216.998
380	10.158	219.694	400	4.42	218.082
380	11.608	219.817	400	4.451	218.525

400	4.485	218.817	420	-4.067	217.806
400	4.525	218.811	420	-1.724	216.324
400	4.656	218.819	420	-0.909	215.824
400	5.278	218.887	420	-0.582	215.82
400	6.807	218.941	420	0	215.827
400	9.053	219.052	420	0.134	215.828
400	10.113	219.112	420	0.884	215.817
400	11.723	219.133	420	1.221	215.817
400	13.507	219.199	420	4.203	217.616
400	14.194	219.257	420	4.424	217.755
400	15.146	219.105	420	4.492	218.564
410	-10.305	219.066	420	4.621	218.574
410	-9.428	219.03	420	7.724	218.645
410	-6.454	219.063	420	8.116	218.647
410	-5.835	218.953	420	12.073	218.833
410	-4.353	218.629	420	12.603	218.829
410	-4.274	218.628	420	15.526	218.788
410	-4.097	218.644	420	15.863	218.816
410	-4.032	218.129	420	17.129	219.003
410	-4.012	217.93	430	-8.531	218.664
410	-3.402	217.54	430	-4.449	218.442
410	-0.955	215.963	430	-4.351	218.434
410	-0.379	215.971	430	-4.275	218.428
410	0	215.97	430	-4.121	218.415
410	0.634	215.969	430	-4.072	217.628
410	1.203	215.964	430	-1.747	216.202
410	3.88	217.57	430	-0.877	215.678
410	4.429	217.899	430	-0.645	215.683
410	4.52	218.71	430	-0.46	215.684
410	4.618	218.696	430	0	215.681
410	4.634	218.697	430	1.292	215.672
410	5.05	218.707	430	3.44	217.035
410	6.562	218.868	430	4.442	217.727
410	9.144	219.016	430	4.565	218.453
410	9.74	219.044	430	4.576	218.454
410	13.925	219.109	430	4.679	218.428
410	14.211	219.105	430	4.949	218.434
410	16.049	219.273	430	9.458	218.454
410	16.112	219.282	430	9.789	218.469
420	-9.215	218.945	430	14.83	218.429
420	-8.165	218.926	430	15.129	218.424
420	-6.117	218.815	430	18.06	218.673
420	-4.766	218.588	430	18.197	218.694
420	-4.351	218.528	440	-20.232	218.3
420	-4.188	218.526	440	-17.025	218.452
420	-4.127	218.519	440	0	218.089
420	-4.086	218.116	440	9.611	219.414

440	9.632	218.754	460	2.118	215.829
440	10.835	218.388	460	4.285	217.194
440	16.97	218.293	460	4.302	217.74
440	18.743	218.112	460	4.355	218.163
440	19.132	218.089	460	4.446	218.161
450	-4.445	217.808	460	4.605	218.174
450	-4.368	218.163	460	4.729	217.773
450	-4.358	218.275	460	4.758	217.537
450	-4.325	218.273	460	4.972	217.716
450	-4.154	218.264	460	5.658	217.668
450	-4.08	217.505	460	5.908	217.017
450	-4.052	217.27	460	6.317	216.979
450	-2.406	216.254	460	6.376	216.623
450	-0.962	215.341	460	6.686	216.429
450	0	215.337	460	14.35	216.471
450	0.953	215.334	460	15.423	216.451
450	1.246	215.331	460	15.646	216.443
450	1.931	215.766	460	18.92	216.403
450	4.239	217.32	460	19.472	216.366
450	4.334	217.634	460	24.296	216.062
450	4.372	218.319	470	-5.064	217.215
450	4.513	218.3	470	-4.537	217.396
450	4.564	218.298	470	-4.496	218.025
450	4.587	218.079	470	-4.347	218.022
450	4.633	217.842	470	-4.267	218.022
450	5.163	217.058	470	-4.229	217.777
450	5.789	216.852	470	-4.191	217.077
450	6.837	216.547	470	-1.877	215.627
450	9.292	216.754	470	-1.305	215.271
450	10.76	216.885	470	-0.958	215.044
450	13.38	217.653	470	0	215.044
450	16.052	217.551	470	0.958	215.044
450	17.492	217.539	470	1.16	215.044
450	20.4	217.369	470	2.112	215.62
450	22.446	217.274	470	4.323	216.991
460	-4.809	217.507	470	4.338	217.971
460	-4.675	217.661	470	4.444	217.98
460	-4.66	218.18	470	4.655	217.996
460	-4.623	218.179	470	4.687	217.652
460	-4.37	218.179	470	4.707	217.491
460	-4.25	217.405	470	5.186	217.459
460	-4.24	217.219	470	5.957	217.458
460	-3.237	216.591	470	6.077	216.988
460	-0.945	215.191	470	6.129	216.995
460	0	215.197	470	6.55	216.109
460	0.809	215.202	470	6.806	215.942
460	1.116	215.202	470	9.172	215.909

470	10.996	215.794	490	-4.527	217.672
470	17.965	216.088	490	-4.318	217.679
470	18.936	216.151	490	-4.211	217.653
470	19.265	216.147	490	-4.187	217.303
470	22.309	216.09	490	-4.111	216.743
470	22.558	216.074	490	-1.926	215.334
470	23.749	216.045	490	-1.012	214.768
470	26.265	215.981	490	0	214.764
480	-8.367	217.186	490	0.796	214.762
480	-4.998	217.281	490	1.164	214.761
480	-4.576	217.338	490	1.859	215.188
480	-4.51	217.558	490	4.305	216.676
480	-4.488	217.852	490	4.362	217.465
480	-4.306	217.859	490	4.386	217.663
480	-4.21	217.857	490	4.414	217.661
480	-4.185	217.401	490	4.63	217.695
480	-4.121	216.928	490	4.666	217.561
480	-3.144	216.318	490	4.718	217.088
480	-0.982	214.911	490	4.97	217.04
480	-0.21	214.911	490	5.711	216.93
480	0	214.91	490	6.22	216.444
480	1.173	214.906	490	6.589	216.181
480	2.861	215.929	490	9.383	215.691
480	4.323	217.363	490	9.837	215.678
480	4.355	217.806	490	10.396	215.676
480	4.48	217.825	490	16.027	215.592
480	4.661	217.839	500	-24.671	216.533
480	4.691	217.566	500	-23.089	216.553
480	4.718	217.265	500	-20.384	216.717
480	5.166	217.199	500	-19.387	216.751
480	5.823	217.199	500	-18.41	216.781
480	6.216	216.387	500	-8.433	217.138
480	6.515	216.106	500	-7.711	217.113
480	8.588	215.95	500	-7.317	217.125
480	11.368	216.057	500	-4.596	217.122
480	14.566	215.801	500	-4.528	217.459
480	21.504	215.927	500	-4.503	217.505
490	-19.813	216.541	500	-4.266	217.444
490	-18.896	216.596	500	-4.226	217.318
490	-17.251	216.758	500	-4.172	216.548
490	-13.011	217.163	500	-3.197	215.932
490	-10.568	217.173	500	-1.053	214.603
490	-9.363	217.17	500	-0.472	214.601
490	-7.092	217.155	500	0	214.6
490	-6.436	217.155	500	1.106	214.597
490	-4.632	217.264	500	4.079	216.427
490	-4.559	217.514	500	4.263	216.594

500	4.375	217.548	510	16.604	215.544
500	4.513	217.541	520	-33.797	216.927
500	4.528	217.543	520	-29.124	216.838
500	4.693	216.926	520	-26.834	216.833
500	5.786	216.717	520	-23.202	216.919
500	5.812	216.713	520	-19.048	217.008
500	5.83	216.696	520	-15.105	217.044
500	7.218	215.709	520	-13.483	217.094
500	7.314	215.692	520	-9.052	217.116
500	11.794	215.562	520	-7.989	217.076
500	17.316	215.544	520	-5.261	216.909
500	18.051	215.533	520	-4.633	216.927
510	-29.203	216.708	520	-4.567	217.155
510	-27.488	216.701	520	-4.528	217.226
510	-23.189	216.764	520	-4.308	217.235
510	-19.32	216.868	520	-4.237	217.241
510	-17.58	216.928	520	-4.13	216.257
510	-12.742	217.077	520	-2.266	215.056
510	-11.352	217.127	520	-1.061	214.292
510	-7.309	216.988	520	-0.524	214.29
510	-5.105	217.054	520	0	214.289
510	-4.666	217.053	520	1.093	214.285
510	-4.655	217.108	520	3.426	215.762
510	-4.512	217.367	520	4.18	216.236
510	-4.472	217.357	520	4.279	217.246
510	-4.229	217.38	520	4.305	217.244
510	-4.207	216.43	520	4.654	217.256
510	-3.369	215.901	520	4.681	216.716
510	-1.072	214.445	520	4.698	216.66
510	0	214.441	520	5.754	216.635
510	0.539	214.44	520	5.843	216.626
510	1.079	214.438	520	5.971	216.553
510	2.238	215.172	520	7.235	215.529
510	4.209	216.388	520	7.639	215.521
510	4.267	216.872	520	11.775	215.496
510	4.321	217.399	520	11.825	215.496
510	4.525	217.406	520	12.342	215.512
510	4.594	217.402	520	14.321	215.569
510	4.675	217.117	520	14.539	215.568
510	4.69	216.794	530	-38.637	217.219
510	5.207	216.695	530	-37.023	217.189
510	5.833	216.679	530	-28.088	216.914
510	6.603	216.057	530	-26.474	216.955
510	7.236	215.606	530	-24.638	216.974
510	9.806	215.535	530	-16.091	217.028
510	12.074	215.518	530	-14.413	217.1
510	13.154	215.548	530	-10.856	217.121

530	-8.849	217.084	540	-1.363	214.19
530	-6.488	216.94	540	-1.048	213.989
530	-4.652	216.786	540	-0.79	213.989
530	-4.595	216.984	540	0	213.987
530	-4.543	217.103	540	1.139	213.985
530	-4.345	217.111	540	2.397	214.755
530	-4.21	217.102	540	4.291	215.923
530	-4.19	216.785	540	4.334	216.942
530	-4.1	216.115	540	4.383	216.94
530	-2.913	215.337	540	4.608	216.928
530	-1.041	214.14	540	4.745	216.482
530	0	214.137	540	4.776	216.34
530	0.5	214.135	540	5.613	216.253
530	1.126	214.134	540	5.815	216.257
530	2.478	214.962	540	7.06	215.55
530	4.238	216.068	540	7.238	215.462
530	4.274	216.424	540	9.66	215.41
530	4.303	217.088	540	12.174	215.364
530	4.485	217.079	540	14.365	215.358
530	4.619	217.083	550	-38.901	216.798
530	4.63	216.875	550	-36.256	216.832
530	4.74	216.515	550	-34.61	216.823
530	5.154	216.505	550	-30.509	216.798
530	5.799	216.437	550	-23.679	216.837
530	6.732	215.905	550	-20.813	216.826
530	7.247	215.488	550	-18.836	216.922
530	9.391	215.446	550	-12.033	217.057
530	10.719	215.438	550	-9.338	216.913
530	13.546	215.431	550	-6.527	216.675
530	14.275	215.454	550	-4.674	216.406
540	-40.979	216.987	550	-4.643	216.644
540	-39.369	216.824	550	-4.553	216.847
540	-36.721	216.818	550	-4.314	216.832
540	-31.773	216.835	550	-4.163	216.83
540	-21.588	216.93	550	-4.121	216.28
540	-19.051	216.946	550	-4.093	215.845
540	-14.79	217.129	550	-2.784	214.97
540	-14.333	217.131	550	-2.426	214.742
540	-9.67	217.045	550	-1.049	213.835
540	-8.995	217.004	550	-0.308	213.834
540	-4.709	216.645	550	0	213.839
540	-4.689	216.711	550	1.167	213.857
540	-4.567	216.988	550	1.506	214.157
540	-4.502	216.99	550	3.23	215.133
540	-4.182	216.969	550	4.339	215.817
540	-4.134	216.22	550	4.349	216.053
540	-4.103	215.988	550	4.377	216.815

550	4.56	216.807	570	-17.78	217.015
550	4.636	216.803	570	-14.301	216.997
550	4.682	216.653	570	-13.67	217.006
550	4.801	216.111	570	-12.929	217.013
550	5.086	216.082	570	-8.647	217.222
550	5.972	216.099	570	-8.585	217.235
550	6.434	215.836	570	-6.997	217.271
550	7.182	215.469	570	-6.108	217.279
550	11.931	215.367	570	0	217.243
550	14.344	215.207	570	6.495	217.497
560	-21.234	216.821	570	6.982	217.33
560	-19.501	216.955	570	7.105	217.243
560	-13.335	216.952	580	-21.919	216.938
560	-11.194	216.982	580	-17.589	216.85
560	-10.529	216.988	580	-17.297	216.85
560	-6.937	216.693	580	-14.396	217.033
560	-6.9	216.696	580	-11.572	217.213
560	-5.349	216.712	580	-11.434	217.217
560	-4.548	216.622	580	-8.264	217.271
560	-4.535	216.729	580	-8.09	217.27
560	-4.265	216.73	580	-6.312	217.135
560	-4.228	216.729	580	-6.216	217.242
560	-4	214.73	580	-6.198	216.974
560	-3.875	214.646	580	-6.18	216.979
560	-2.661	213.707	580	-5.934	216.939
560	-0.706	213.709	580	-5.869	213.522
560	0	213.709	580	-5.405	213.524
560	2.559	213.71	580	-0.657	213.485
560	2.777	213.709	580	-0.477	213.485
560	2.855	213.766	580	-0.052	213.488
560	4.035	214.704	580	0	213.488
560	4.161	214.681	580	2.394	213.499
560	4.171	214.929	580	5.805	213.524
560	4.44	216.758	580	6.059	213.522
560	4.53	216.755	580	6.07	213.838
560	4.687	216.753	580	6.163	217.229
560	4.757	216.327	580	6.192	217.229
560	4.816	216.063	580	6.502	217.229
560	5.313	216.064	580	6.542	215.534
560	6.566	216.076	580	6.778	215.527
560	7.022	215.819	580	8.286	215.488
560	8.045	215.349	580	11.426	215.455
560	9.153	215.343	580	12.195	215.401
560	12.033	215.164	580	14.472	215.374
560	16.763	215.234	580	18.662	215.365
570	-21.59	217.018	590	-21.963	216.912
570	-21.374	217.013	590	-20.483	216.883

590	-17.62	216.953	600	7.065	215.295
590	-15.462	217.091	600	7.184	215.296
590	-11.689	217.194	600	8.296	215.284
590	-10.386	217.216	600	13.992	215.208
590	-6.948	217.187	600	15.244	215.226
590	-6.23	217.13	610	-22.811	216.862
590	-6.165	217.198	610	-20.781	216.918
590	-6.126	217.241	610	-19.167	216.963
590	-5.888	213.699	610	-16.721	217.03
590	-5.657	213.764	610	-13.717	217.11
590	-5.624	213.404	610	-10.271	217.102
590	-5.576	213.404	610	-7.846	217.082
590	-5.082	213.4	610	-6.284	217.065
590	-2.589	213.397	610	-6.145	217.182
590	0	213.415	610	-6.101	217.228
590	2.944	213.436	610	-5.835	214.26
590	3.548	213.435	610	-5.739	213.348
590	6.037	213.411	610	0	213.335
590	6.168	217.206	610	1.086	213.332
590	6.48	217.206	610	1.879	213.332
590	6.51	217.068	610	6.125	213.562
590	6.571	215.35	610	6.184	217.234
590	9.612	215.269	610	6.296	217.234
590	11.09	215.231	610	6.524	217.234
590	16.034	215.303	610	6.562	216.599
590	17.548	215.298	610	6.761	215.282
600	-22.261	216.888	610	13.152	215.162
600	-21.556	216.907	610	16.12	215.176
600	-18.152	217.002	610	17.209	215.164
600	-12.993	217.144	620	-23.362	216.835
600	-12.296	217.162	620	-23.035	216.844
600	-11.498	217.16	620	-22.06	216.871
600	-6.575	217.118	620	-15.177	217.056
600	-6.198	217.114	620	-14.956	217.055
600	-6.164	217.143	620	-9.112	217.043
600	-6.074	217.237	620	-9.058	217.047
600	-5.965	216.019	620	-6.379	217.017
600	-5.854	215.983	620	-6.366	217.018
600	-5.68	213.373	620	-6.127	217.22
600	-3.848	213.377	620	-5.712	213.309
600	-2.736	213.372	620	-2.821	213.302
600	0	213.379	620	0	213.302
600	1.262	213.381	620	4.329	213.303
600	6.078	213.364	620	6.165	215.32
600	6.174	217.258	620	6.195	217.21
600	6.513	217.247	620	6.418	217.21
600	6.807	215.3	620	6.535	217.209

620	6.611	215.952	640	6.558	217.134
620	6.715	215.263	640	6.621	216.089
620	14.96	215.108	640	6.667	215.152
620	17.334	215.06	640	13.825	214.936
630	-23.807	216.94	640	17.114	214.872
630	-21.448	216.865	650	-24.332	217.086
630	-17.268	216.978	650	-22.106	217.019
630	-13.349	216.947	650	-20.052	217.025
630	-10.229	216.94	650	-17.384	217.018
630	-8.321	217.089	650	-13.333	216.973
630	-6.898	217.073	650	-10.194	216.938
630	-6.294	217.041	650	-8.044	217.105
630	-6.248	217.109	650	-7.361	217.069
630	-6.121	217.217	650	-6.184	217.07
630	-5.906	217.192	650	-6.153	217.113
630	-5.716	217.186	650	-6.101	217.191
630	-5.694	213.271	650	-5.879	217.184
630	-5.243	213.271	650	-5.765	217.179
630	-3.098	213.272	650	-5.743	214.344
630	0	213.272	650	-5.726	213.181
630	4.975	213.272	650	-4.604	213.182
630	6.189	213.272	650	-2.721	213.178
630	6.207	217.185	650	0	213.177
630	6.546	217.185	650	1.105	213.176
630	6.668	215.245	650	2.811	213.182
630	7.382	215.231	650	6.205	213.18
630	17.335	215.028	650	6.23	217.08
640	-24.209	217.038	650	6.573	217.023
640	-20.475	216.926	650	6.669	215.051
640	-19.506	216.895	650	8.078	215.008
640	-19.36	216.899	650	17.28	214.536
640	-11.743	216.839	660	-24.562	217.12
640	-11.346	216.838	660	-20.94	217.14
640	-7.583	217.13	660	-15.703	217.136
640	-7.416	217.129	660	-15.172	217.135
640	-6.221	217.066	660	-15.055	217.132
640	-6.13	217.2	660	-8.655	217.068
640	-6.115	217.213	660	-7.882	217.07
640	-6.089	217.211	660	-6.153	217.071
640	-5.702	213.239	660	-6.078	217.166
640	-3.55	213.237	660	-5.825	216.787
640	-2.818	213.237	660	-5.786	213.089
640	-0.06	213.237	660	-3.893	213.091
640	0	213.237	660	-1.923	213.093
640	6.197	214.748	660	0	213.092
640	6.218	217.134	660	3.535	213.09
640	6.387	217.134	660	6.262	213.087

660	6.281	214.504
660	6.328	216.524
660	6.361	216.52
660	6.569	216.52
660	6.706	215.452
660	6.74	214.738
660	15.198	214.652
660	17.344	214.531
670	-25.363	217.073
670	-24.22	217.079
670	-22.566	217.078
670	-11.362	217.051
670	-8.892	216.984
670	-7.189	216.967
670	-6.519	216.968
670	-6.257	216.987
670	-6.239	217.013
670	-6.113	217.099
670	-5.947	217.113
670	-5.867	215.205
670	-5.841	213.008
670	-3.322	213.011
670	-0.764	213.007
670	0	213.009
670	2.814	213.015
670	6.366	213.011
670	6.393	214.292
670	6.431	215.936
670	6.499	215.928
670	6.568	215.928
670	6.675	215.093
670	6.741	214.788
670	9.749	214.73
670	16.47	214.613
670	17.165	214.607
680	-20.541	217.141
680	-19.782	217.132
680	-18.81	217.128
680	-17.221	217.062
680	-11.222	216.868
680	0	216.868

ANEJO N° 3

**ESTIMACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA Y
EMISIÓN DE SEDIMENTOS**

ÍNDICE

0. RESUMEN	5
1. INTRODUCCIÓN	5
2. CONTEXTO TEÓRICO Y ESTADO DE LA CUESTIÓN	6
2.1. <i>¿Qué es la erosión del suelo?</i>	6
2.2. <i>Mecanismos y factores de la erosión</i>	6
3. MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMAR LA EROSIÓN.....	7
3.1. <i>La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)</i>	8
3.1.1. <i>Factor Erosividad de la lluvia (R):</i>	8
3.1.2. <i>Factor Erodabilidad del suelo (K):</i>	9
3.1.3. <i>Factor topográfico (LS)</i>	10
3.1.4. <i>Factor cobertura del suelo (C):</i>	11
3.1.5. <i>Factor prácticas de conservación del suelo (P):</i>	12
3.2. <i>La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE)</i>	12
4. APLICACIÓN DEL MÉTODO MUSLE.....	13
4.1. <i>Cartografía digital base utilizada</i>	13
4.2. <i>Metodología</i>	13
4.2.1. <i>Cálculo del volumen de escorrentía (V)</i>	13
4.2.2. <i>Cálculo del caudal instantáneo máximo (Q_p)</i>	14
4.2.3. <i>Cálculo del factor de Erodabilidad del suelo (K)</i>	14
4.2.4. <i>Cálculo factor de grado de cobertura vegetal (C)</i>	19
4.2.5. <i>Cálculo del factor prácticas de conservación (P)</i>	23
4.2.6. <i>Cálculo del factor topográfico (LS)</i>	25
4.3. <i>Discusión y conclusiones</i>	29
5. RESULTADOS DEL MÉTODO MUSLE	29
6. CONCLUSIONES	30

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Fig. 1: Monograma de erodabilidad.....</i>	<i>10</i>
<i>Fig. 2: Mapa edafológico digital</i>	<i>15</i>
<i>Fig. 3: Factor “K” sobre cuenca del arroyo de las Canteras</i>	<i>19</i>
<i>Fig. 4: Mapa de Usos del suelo de la cuenca del arroyo de las Canteras.</i>	<i>20</i>
<i>Fig. 5: Factor “C” sobre cuenca del arroyo de las Canteras</i>	<i>23</i>
<i>Fig. 6: Factor “P” en la cuenca del arroyo de las Canteras</i>	<i>24</i>
<i>Fig. 7: Mapa de pendientes (dada en grados) de la cuenca del a. de las Canteras.....</i>	<i>25</i>
<i>Fig. 8: Mapa de dirección del flujo en la cuenca del arroyo de las Canteras.</i>	<i>26</i>
<i>Fig. 9: Mapa de acumulación de flujo en la cuenca del arroyo de las Canteras.....</i>	<i>27</i>
<i>Fig. 10: Mapa de valores del factor “LS” en la cuenca del a. de las Canteras.....</i>	<i>28</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Valores del factor “K” según la textura del suelo.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2: Factor “K” según el tipo de suelo.</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 3: Valores del factor de cubierta vegetal “C”, para matorrales y vegetación permanente.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 4: Valores de “C” en cultivos de suelos andaluces</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 5: Valores de factor “C” en la cuenca del arroyo de las Canteras.</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 6: Valores del factor de prácticas de conservación “P”.</i>	<i>24</i>

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1: Pérdida anual de suelo.....</i>	<i>8</i>
<i>Ecuación 2: Factor erodabilidad del suelo.....</i>	<i>9</i>
<i>Ecuación 3: Factor topográfico.....</i>	<i>11</i>
<i>Ecuación 4: Cantidad de sedimentos que se producen en una tormenta determinada</i>	<i>12</i>
<i>Ecuación 5: Volumen de escorrentía.....</i>	<i>13</i>



0. RESUMEN

La pérdida de suelo por erosión hídrica supone un grave problema medioambiental ya que contribuye a la pérdida de productividad y biodiversidad de los suelos. Los territorios del sureste español, debido al relieve, climatología, usos del suelo y suelos poco evolucionados que presentan, se ven en su mayor parte muy afectados por este proceso.

En el presente estudio se basa en la implementación de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Modificada (MUSLE) para calcularla cantidad de sedimentos emitidos debido a un aguacero asociado a un periodo de retorno de 500 años en la cuenca hidrográfica del arroyo de las Canteras (Castro del Río). Se toma un periodo de retorno de 500 años ya que es el valor indicado por la administración para la realización de obras en zonas de dominio público hidráulico que afecten a núcleos de población. Así se obtendrá un nivel de seguridad suficiente frente a inundaciones.

Los resultados obtenidos muestran que la erosión en la cuenca produce una pérdida de una gran cantidad de toneladas de suelo por aguacero, principalmente debido a la ausencia de cobertura vegetal densa, ya que casi la totalidad de la cuenca se encuentra cubierta por olivar de secano con prácticas de laboreo a suelo desnudo todo el año.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso no renovable que sirve como soporte de prácticamente todas las actividades productivas fundamentales para el hombre. Existen diversos factores de degradación de los suelos que pueden poner en peligro la sostenibilidad de este recurso. Entre ellos cabe destacar la erosión, que constituye al mismo tiempo uno de los problemas medioambientales globales más importantes (Pimentel, D.*et al.*, 1995).

La erosión del suelo es un daño que tradicionalmente se ha asociado a la agricultura en zonas tropicales o semiáridas, y es importante por sus efectos a largo plazo sobre la productividad y sostenibilidad agrícola. Sin embargo, es un problema que presenta mayor importancia al afectar además a las tierras forestales, al transporte y a las áreas de esparcimiento.

España está considerada una de las áreas más susceptibles de Europa en cuanto a riesgo de erosión del suelo, principalmente debido a la climatología que presenta largos periodos secos seguidos por tormentas de gran intensidad.

Se analizará la pérdida de suelo en la cuenca hidrográfica del arroyo de las Canteras, situada en la localidad de Castro del Río (Córdoba), mediante la implementación de la



Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE) con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS).

Se conocerá el grado de erosión que presenta la cuenca del arroyo de las Canteras, y la cantidad de sedimentos emitidos, es decir las toneladas de suelo que llegan al tramo de actuación.

2. CONTEXTO TEÓRICO Y ESTADO DE LA CUESTIÓN

2.1. ¿QUÉ ES LA EROSIÓN DEL SUELO?

La erosión del suelo se define como un fenómeno geológico producido por el desprendimiento y transporte de partículas y material del suelo que se terminan depositando en otro lugar.

La erosión geológica es un proceso natural que normalmente presenta una intensidad baja, el problema surge cuando, debido a la intervención del hombre, comienza a producirse una erosión acelerada que impide que el suelo se regenere. Esto puede suponer un peligro para el aprovechamiento del territorio, influyendo además de forma determinante en los procesos de desertificación.

Sobre terrenos agrícolas la erosión puede desencadenar la disminución de la profundidad cultivable y la fertilidad de los suelos, intensificando así la dependencia de fertilizantes y causando incluso el abandono de los terrenos.

En otros casos si la erosión es muy intensa puede alterar el funcionamiento de los ríos, la capacidad de retención de zonas inundables e incluso la colmatación y eutrofización de los embalses y masas de agua. (Alatorre, L.C. & Beguería, S. ,2009).

Afrontar la erosión requiere el conocimiento de los procesos erosivos y el estudio de sus factores causales, para establecer políticas de conservación y conseguir solucionarlo desde la raíz del problema.

2.2. MECANISMOS Y FACTORES DE LA EROSIÓN

Este estudio se centrará únicamente en la erosión hídrica, es decir, la producida por el agua de lluvia. Dicha erosión es un factor clave a tener en cuenta para el éxito de la restauración debido a la posible colmatación de sedimentos del cauce si se produce una escorrentía sin velocidad de caudal suficiente con gran cantidad de toneladas de suelo añadidas.

Existen cinco factores responsables de la erosión hídrica del suelo:



1. La precipitación: en el proceso de erosión hídrica el arranque de material suele producirse por el impacto y salpicadura de las gotas de lluvia, además el transporte de partículas viene dado por los flujos laminares que se crean en superficie.
2. El suelo: La naturaleza de los materiales que lo forman, su textura, profundidad y la permeabilidad del mismo van a determinar el grado de sensibilidad que presenta este frente a la erosión.
3. La topografía: La inclinación y la longitud de la pendiente del terreno juegan un papel fundamental en este proceso, así a mayor inclinación y longitud de pendiente suele existir una mayor erosión.
4. La vegetación que recubre el terreno actúa disminuyendo la erosión ya que protege y sujeta el suelo, y además frena la escorrentía favoreciendo la sedimentación de las partículas transportadas.
5. El uso del suelo es un factor primordial condicionante de la erosión ya que modifica sus condiciones naturales. La erosión dependerá en buena medida del manejo y del tipo de cultivo implantado.



3. MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMAR LA EROSIÓN.

Desde la segunda mitad del s. XX han proliferado gran cantidad de modelos matemáticos que permiten realizar cálculos aproximados para evaluar la pérdida de suelo por erosión a distintas escalas.

Numerosas administraciones públicas han apostado por el desarrollo y aplicación de estos modelos, como es el caso de la Agencia de Protección Ambiental (USEPA) y del Departamento de Agricultura (USDA) de los EEUU. En la Unión Europea también se han creado nuevos modelos como EUROSEM, PESERA, etc.

Estos modelos varían en sus requerimientos de información, insumos y en su facultad para predecir otros procesos tales como el ciclo hidrológico, pérdida de nutrientes por lixiviación y escorrentía y/u otros procesos incluyendo el desarrollo de los cultivos.



3.1. LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO (USLE)

Aunque existen gran cantidad de modelos para calcular la erosión del suelo, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Universal Soil Loss Equation) es el modelo de estimación de la erosión del suelo con mayor aceptación y de más amplia aplicación.

Se trata de una tecnología empírica generada mediante un proceso evolutivo que ha tenido lugar en los últimos 60 años, y está aún en fase de evolución con el desarrollo de diversas revisiones. Fue desarrollada durante la primera mitad del siglo 20 por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA).

Este modelo está basado en una serie de relaciones estadísticas entre las pérdidas de suelo y determinadas variables reconocidas como los factores implicados de mayor significación en el proceso de erosión hídrica en cuencas grandes.

La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) por erosión laminar y en regueros, que establecen Wischmeier y Smith, permite la evaluación de las pérdidas de suelo por erosión laminar y en regueros, bajo diferentes combinaciones de uso y manejo del suelo y cubierta y teniendo en cuenta las características físicas del terreno (consultado el Mapa de estados erosivos), mediante la ecuación:

Ecuación 1
$$A = R.K.LS.C.P$$

La USLE tiene en cuenta seis factores:

- **A**: Pérdida anual de suelo (t/ha).
- **R**: Erosividad de la lluvia ($J \cdot \text{cm}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$).
- **K**: Erodabilidad del suelo ($\text{t} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^2/(\text{ha} \cdot J \cdot \text{cm})$).
- **LS**: Longitud de la pendiente en metros y gradiente (adimensional).
- **C**: Factor cobertura (adimensional).
- **P**: Prácticas de conservación del suelo (adimensional).

3.1.1. FACTOR EROSIVIDAD DE LA LLUVIA (R):

Representa la energía con que las gotas de lluvia impactan en el suelo a determinada intensidad rompiendo los agregados superficiales en partículas de tamaño transportable. Se trata de un factor activo en el proceso de erosión.

Para su cálculo se han diseñado numerosos índices que se han utilizado en modelos de predicción del riesgo de erosión, siendo el más conocido el factor “R” empleado por el Departamento de Agricultura de los EEUU. El factor “R” se deduce partir del producto de la energía cinética liberada por la lluvia (E) y la máxima intensidad de precipitación durante un intervalo de 30 minutos (I_{30}) de la tormenta.



Para el cálculo del índice de Erosividad de la lluvia propuesto por Wischmeier, se necesita contar con información pluviométrica muy específica muy difícil de obtener. Por ello, numerosos autores han señalado la gran dificultad que existe para poder aplicar en algunos territorios este índice, donde la red de pluviógrafos existentes es escasa, y está irregularmente distribuida, como ocurre en España.

Para resolver este problema, se han propuesto algunos índices adicionales que permiten calcular de forma más sencilla el índice de erosividad de la lluvia: el índice de agresividad climática de Fournier (1960), que muestra una alta correlación con la cantidad de sedimentos arrastrados por escorrentía, y el índice modificado de Fournier (IFM), que después del índice R es el más utilizado.

Por otro lado, el ICONA (1988) ha elaborado un mapa de isolíneas para el factor “R” para toda España, por lo que utilizaremos dicho mapa para obtener el valor del factor “R” asociado a la cuenca del arroyo de las Canteras.

3.1.2. FACTOR ERODABILIDAD DEL SUELO (K):

Este factor representa la respuesta del suelo a una determinada fuerza o mecanismo erosivo, es decir, la susceptibilidad que presenta el suelo a ser erosionado.

Este parámetro se obtiene a través de una ecuación de regresión que pone en relación K con diversas propiedades del suelo, como son su textura, estructura, permeabilidad, presencia de materia orgánica y profundidad.

La ecuación matemática es la siguiente:

Ecuación 2

$$100.K = 10^{-4.2} \cdot 2,71 \cdot T^{1.14} \cdot (12 - a)] + 4,2 \cdot (b - 2) - 3,23 \cdot (c - 3)$$

**a: contenido en materia orgánica (%)*

**b: Parámetro de estructura de los 15 cm superficiales según la siguiente codificación:*

1. granulo muy fino y grumo muy fino (<1mm)
2. granulo fino y grumo muy fino(1-2 mm)
3. granulo y grumo medio (2-5 mm) y granulo grueso (5-10 mm)
4. granulo liso, prismático, columnar y muy grueso (>10mm)

**c: parámetro de permeabilidad del perfil, según la siguiente codificación del USDA-Soil Survey Manual:*

1. Rápida a muy rápida; 2. Medianamente rápida; 3 Moderada; 4. Moderadamente lenta; 5. Lenta; 6. Muy lenta

**K: expresado en $t.m^2.h.ha^{-1}.hJ^{-1}.cm^{-1}$*

**M: Parámetro de textura de los 15 cm superficiales ($T = [(100 - Ac) \cdot (L + Armf)]$)*

**L+Armf: limo más arena muy fina [0,1-0,002 mm]*

**Ac: arcilla [$<0,002$ mm]*



Wischmeier y Smith generaron un nomograma de erodabilidad donde se relacionan de forma gráfica los valores de “K” con las propiedades anteriormente citadas del suelo.

Este nomograma permite calcular el valor de “K” de forma gráfica y actualmente esta es la manera más extendida para hallar este parámetro.

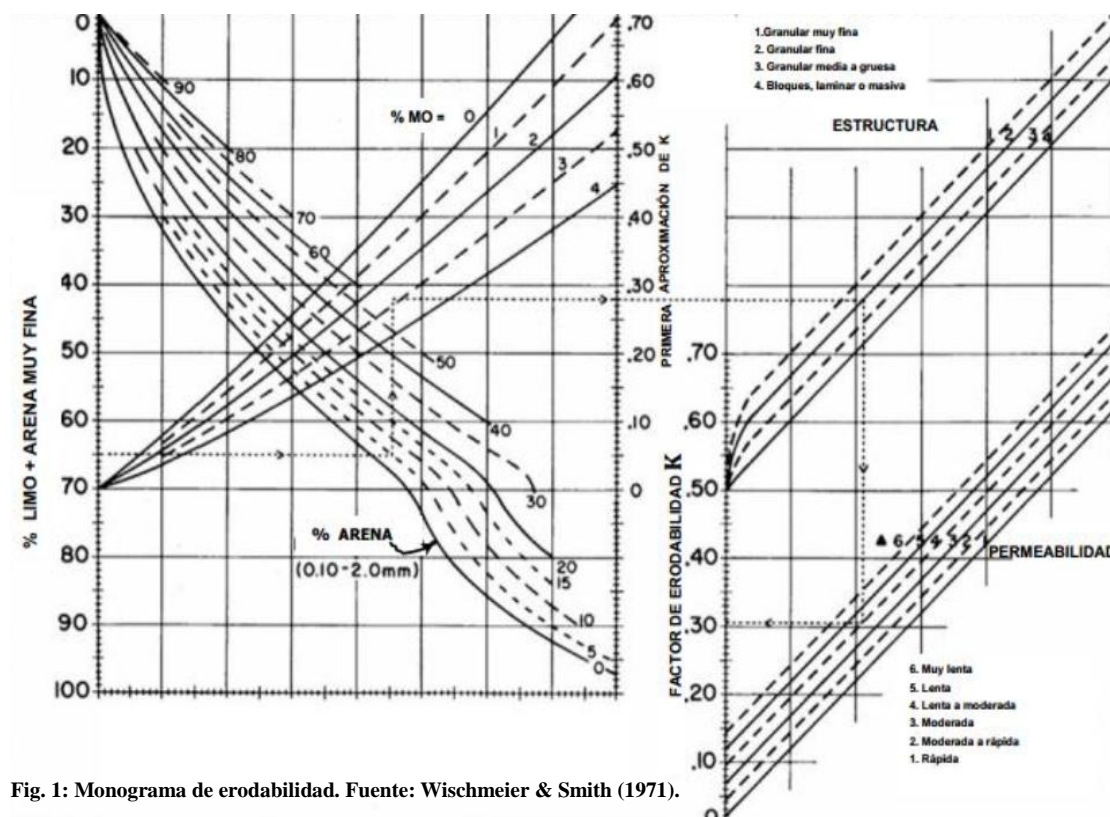


Fig. 1: Monograma de erodabilidad. Fuente: Wischmeier & Smith (1971).

Actualmente en numerosos estudios encontramos tablas donde se presentan los valores estimados de “K” teniendo en cuenta la naturaleza de las litofacies o el tipo de suelo. Como por ejemplo las generadas por el ICONA en 1982.

3.1.3. FACTOR TOPOGRÁFICO (LS)

Este factor combina dos parámetros distintos: la longitud de la pendiente (L) y su ángulo de inclinación (S).

“LS” representa la relación de pérdida de suelo que se espera por unidad de área en una pendiente determinada x en relación con la pérdida correspondiente en una pendiente del 9% y de 22,13 metros de longitud. Este factor es uno de los más difíciles de calcular



cuando no se aplica la USLE a escala de parcelas, donde los terrenos son uniformes tanto en grado de pendiente como en longitud de flujo.

Wischmeier y Smith propusieron una ecuación para el cálculo de este factor así como un nomograma, sin embargo en los últimos años han aparecido diversas ecuaciones adaptadas a las nuevas tecnologías, como la utilización de los SIG, que permiten calcular este factor.

Entre ellas destaca la propuesta por Moore and Burch (1986 a,b) basada en la acumulación del flujo o caudal y la pendiente.

Ecuación 3

$$LS = \left(\frac{\text{Flujo acumulado} * \text{tamaño de la celda}}{22,13} \right)^{0,4} * \left(\frac{\text{sen(pendiente(grados))}}{0,0896} \right)^{1,3}$$

Esta fórmula es la más utilizada en trabajos donde se implementa la USLE en un SIG para evaluar la pérdida de suelo sobre territorios extensos. El flujo acumulado de capa ráster queda expresado como un número o conjunto de celdas (derivadas de las fases del proceso de delimitación de cuencas). El tamaño de la celda se refiere a la longitud de uno de los lados de las celdas.

3.1.4. FACTOR COBERTURA DEL SUELO (C):

El factor vegetación representa el grado de protección que un determinado tipo de cubierta vegetal ofrece al suelo, ya que éste contribuye a frenar la erosión. Para el cálculo de este parámetro existen tabulaciones en lugar de ecuaciones.

Wischmeier y Smith propusieron en su modelo valores entre el 0 y 1 para este parámetro que dependerá del tipo de vegetación existente y de su grado de cobertura.

Supone un factor decisivo en la USLE ya que por muy abrupto que sea el terreno si la vegetación se encuentra bien desarrollada la erosión será leve.

La gran mayoría de los estudios se apoya en estudios de campo previos para observar la naturaleza de la cobertura y tras una clasificación de la misma se asignan los valores estimados por Wischmeier y Smith o por otros organismos como el ICONA (1982).

Si no se posee la facilidad de observar la cobertura directamente, se utilizará el mapa de usos del suelo del SIOSE o el Mapa Forestal de España.



3.1.5. FACTOR PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DEL SUELO (P):

Representa la relación existente entre las pérdidas de suelo que tienen lugar bajo determinada práctica de conservación de suelo y las pérdidas que ocurren en la misma área sin que existan prácticas de conservación.

Las adecuadas prácticas de conservación rigen la escorrentía, reducen la velocidad del agua y dificulta la concentración.

Las prácticas incluidas son: laboreo en curvas de nivel, cultivos en fajas y cultivo en terrazas. Este parámetro toma valores entre 0 y 1.

En numerosas ocasiones los estudios en los que se aplica la USLE no consideran este factor bien por falta de información disponible al respecto o por no existir prácticas de conservación en la zona de estudio.

3.2. LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO MODIFICADA (MUSLE)

La MUSLE (USLE modificada) se formula de manera diferente a la USLE pues su propósito difiere de forma sustancial: ya no se trata de hacer una estimación promediada a largo plazo, toneladas por hectárea y año, sino de calcular el aporte de sedimento para un evento singular, es decir, una tormenta determinada. Su expresión es la siguiente:

Ecuación 4

$$Y = 11,8 \cdot (V \cdot Q_p)^{0,56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS$$

**Y: cantidad de sedimentos que se producen durante una tormenta singular (t/aguacero).*

**V: volumen de escorrentía (m³).*

**Q_p: caudal instantáneo máximo (m³/s).*

***El resto de factores son los mismos que para la USLE.*

Los valores de los factores “K”, “C”, “P” y “L.S”, al contrario que en el m

étodo USLE, se toman como valores medios para la cuenca.

Se aplicará el método MUSLE para calcular la cantidad de sedimentos que producirá la tormenta generadora del caudal asociado al periodo de retorno de 500 años para la cuenca del arroyo de las Canteras.



4. APLICACIÓN DEL MÉTODO MUSLE

En este apartado se han descrito las herramientas y métodos utilizados para la aplicación del método MUSLE y la obtención de resultados.

4.1. CARTOGRAFÍA DIGITAL BASE UTILIZADA

Para la realización de este estudio se ha partido de información de diferentes capas digitales. Todas ellas proyectadas en el sistema de coordenadas ETRS89, UTM Huso 30.

- Modelo Digital del Terreno (tamaño de celda: 5x5 metros).
- Mapa litológico nacional a escala 1:50.000. (MAGNA50).
- Capa vectorial de líneas con la red hidrográfica y curvas de nivel de España. (BCN25) (Escala 1:25.000).
- Capa vectorial de polígonos SIOSE (usos del suelo).
- Mapa edafológico digital (1:1.000.000), editado en el año 2001 por el Sistema Español de Información de Suelos.

4.2. METODOLOGÍA

Para implementar la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Modificada (MUSLE), se ha calculado por separado cada uno de los factores que la integran, ayudados de la cartografía digital utilizada en ArcGIS y mediante una serie de operaciones, dando como resultado un valor para cada factor requerido que serán utilizados para despejar la ecuación de la cantidad de sedimentos emitidos en una tormenta singular (*ecuación 4*)

4.2.1. CÁLCULO DEL VOLUMEN DE ESCORRENTÍA (V)

Para calcular V, el volumen de escorrentía producido, la fórmula a aplicar es la siguiente:

Ecuación 5

$$V = P.Ce.S$$

* *P*: Volumen de agua producido por el aguacero

* *Ce*: Coeficiente de escorrentía

* *S*: Superficie de la cuenca

El volumen de agua producido por el aguacero será el asociado al periodo de retorno de 500 años, por lo tanto, el valor de la precipitación máxima diaria para la cuenca del arroyo de



las Canteras será obtenido mediante el software Maxpluwin para dicho periodo de retorno, resultando un valor de $P_t = 140 \text{ mm}$.

El coeficiente de escorrentía de la cuenca está calculado en el anejo nº2: “Estudio hidrológico e hidráulico” y tiene un valor de 0,454.

La superficie de la cuenca es $8,84 \text{ km}^2 = 8.840.000 \text{ m}^2$.

Multiplicando estos tres valores se obtiene un volumen de escorrentía con valor de:

$$V = 561.870 \text{ m}^3$$

4.2.2. CÁLCULO DEL CAUDAL INSTANTÁNEO MÁXIMO (Q_p)

Para obtener el valor del caudal instantáneo máximo, Q_p , se toma del caudal máximo asociado al periodo de retorno de 500 años (Q_{T500}), calculado anteriormente mediante el método de Témez en el *anejo nº2: "Estudio hidrológico e hidráulico"*

Resultando un valor de:

$$Q_p = 53,46 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.2.3. CÁLCULO DEL FACTOR DE ERODABILIDAD DEL SUELO (K)

Para HUDSON (1.982) hay dos grupos de factores que influyen en la erodabilidad de los suelos, por una parte, las características físicas del suelo, y por otra, los tratamientos y usos que sobre él se desarrollan.

Los valores de este factor, suelen obtenerse a partir de medidas realizadas en trabajo de campo, sin embargo, cuando el territorio de estudio es de grandes dimensiones, como en el caso del estudio de cuencas, esto es demasiado laborioso. Por ello se suele recurrir a mapas litológicos o a mapas edafológicos y a partir de ahí se asignan valores estimados.

En este estudio, los valores de erodabilidad han sido asignados a partir del tipo de suelo y la edafología existente en cada zona.

Para ello se ha consultado el mapa edafológico digital a escala 1:1.000.000, editado en el año 2001 por el Sistema Español de Información de Suelos, que emplea la taxonomía de suelos de USDA (Soil Taxonomy) según la clasificación de la FAO/UNESCO.

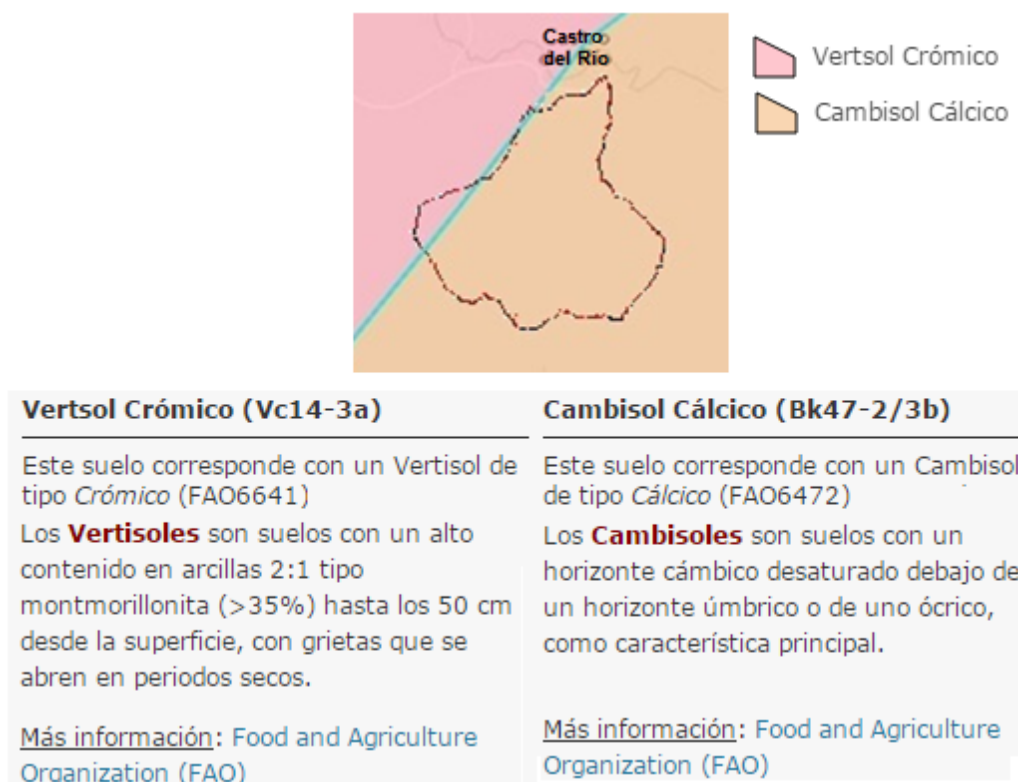


Fig. 2: Mapa edafológico digital obtenido de (<http://www.arccgis.com>. Fuente: FAO)

Vertisol Crómico sobre margas blancas arenosas

El material original lo constituyen sedimentos con una elevada proporción de arcillas esmectíticas, o productos de alteración de rocas que las generen.

La alternancia entre el hinchamiento y la contracción de las arcillas, genera profundas grietas en la estación seca y la formación de superficies de presión y agregados estructurales en forma de cuña en los horizontes subsuperficiales.

Cambisol Cálculo sobre margas blancas arenosas

Los suelos Cambisol son los que presentan mayor extensión en la zona. Según la FAO son suelos medianamente evolucionados, pobres en materia orgánica y presentan un perfil tipo A-(B)-C en el que puede aparecer un horizonte cámbico (B) que presenta un moderado grado de evolución.

Una vez estudiada la edafología, como los valores de “K” varían además según la textura que presente el suelo y no existe dicha información en el mapa anterior, se ha consultado el Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 desarrollado por el IGME con un resultado



del 100% de la cuenca ocupada por margas blancas arenosas. (Ver “Fig.25: Mapa litológico nacional” del anexo 1: “Caracterización general de la cuenca”)

Ya definida el área de la cuenca, se ha buscado bibliografía para asignar equivalencias de los suelos existentes entre la Soil Taxonomy y la clasificación de suelos de la FAO, ya que el ICONA en 1982 publicó una tabla con los valores de “K” para cada tipo de suelo en España siguiendo esta última clasificación y atendiendo a la textura del suelo.

Tabla 1: Valores del factor “K” según la textura del suelo. Fuente: Gisbert e Ibáñez 2003.

Factor K	Litología
0.2	"SC 1 Conglomerados"
0.2	"SC 1-2 Conglomerados y areniscas"
0.2	"SC 1-2-4 Conglomerados, areniscas y arcillas"
0.2	"SC 1-4 Conglomerados y arcillas"
0.2	"SC 1-10 Conglomerados y margas"
0.3	"SC 2 Areniscas"
0.3	"SC 2-4 Areniscas y arcillas"
0.3	"SC 2-10 Areniscas y margas"
0.4	"SC 4 Arcillas"
0.4	"SC 4-2 Arcillas y areniscas"
0.4	"SC 4-10 Arcillas y margas"
0.3	"SC 5 Calcáreas"
0.3	"SC 5-2 Calcáreas y areniscas"
0.3	"SC 5-6 Calcáreas y calcarenitas"
0.3	"SC 5-7 Calcáreas y calcáreas margosas"
0.3	"SC 7-10 Calcáreas margosas y margas"
0.3	"SC 8 Calcáreas tovacias"
0.3	"SC 9 Dolomías"
0.3	"SC 9-5 Dolomías y calcáreas"
0.3	"SC 9-10 Dolomías y margas"
0.5	"SC 10 Margas"
0.5	"SC 10-2 Margas y areniscas"
0.6	"SC 12 Arcillas, margas y yesos"
0.2	"SI 2 Cantos y gravas"
0.2	"SI 2-3 Cantos, gravas y arenas"
0.2	"SI 2-3-4 Cantos, gravas, arenas y limos"
0.2	"SI 2-3-5 Cantos, gravas, arenas y arcillas"
0.2	"SI 2-4 Cantos, gravas y limos"
0.2	"SI 2-5 Cantos, gravas y arcillas"
0.2	"SI 3 Arenas"



0.2	"SI 3-2 Arenas, gravas y cantos"
0.2	"SI 3-4 Arenas y limos"
0.2	"SI 3-5 Arenas y arcillas"
0.5	"SI 4 Limos"
0.5	"SI 4-2 Limos, gravas y cantos"
0.5	"SI 4-3 Limos y arenas"
0.5	"SI 4-5 Limos y arcillas"
0.4	"SI 5 Arcillas"
0.4	"M-1 Pizarras y cuarcitas"
0.4	"M-2 Rocas carbonatadas y filitas"
0.4	"M-3 Metabasitas"
0.2	"V-1 Basaltos"
0.2	"V-2 Ofitas"
0.2	"V-3 Brechas y tovas volcánicas"

El valor asociado a las margas blancas arenosas existentes en la cuenca hidrográfica corresponde al de: "SC 10-2 Margas y areniscas": $K = 0.5$

Los Vertisoles sobre margas arenosas de las campiñas de Córdoba y Jaén, ofrecen valores altos y uniformes para los horizontes superficiales y subyacentes ($x = 1,13$), siendo este valor asignado por ICONA (1982 b) a suelos similares descritos en el mapa de los suelos de España. Por tanto, para la zona de Vertisol crómico asociado a margas blancas arenosas el valor del factor "K" es:

$$\text{Factor "K"} = 1,13 \text{ (t/ha.m}^2\text{.h/hJ.cm)}$$

Según el ICONA (1982 b) para suelos de Cambisol cálcico asociados a margas blancas arenosas (albarizas y/o moronitas) el valor del factor "K" es:

$$\text{Factor "K"} = 0,55 \text{ (t/ha.m}^2\text{.h/hJ.cm)}$$

Ya que el factor "K" es variable según la metodología utilizada para su cálculo, aparte de los valores asignados por Gisbert e Ibañez, 2003, y los valores asignados por el ICONA (1892 b), se obtendrán los valores para los suelos de Cambisol cálcico y Vertisol crómico según la FAO, 1980.



Tabla 2: Factor “K” según el tipo de suelo. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de suelo. FAO, 1980. Roma. 86p

Factor "K" (t*m²*h/ha*hJ*cm)			
SUELOS	TEXTURA GRUESA	TEXTURA MEDIA	TEXTURA FINA
Luvisol	0,197	0,304	0,099
Luvisol rómico	0,197	0,304	0,099
Calcisol	0,402	0,599	0,197
Cambisol	0,197	0,304	0,099
Cambisol cálcico	0,197	0,304	0,099
Cambisol húmico	0,099	0,152	0,053
Acrisol	0,197	0,304	0,099
Regosol	0,197	0,304	0,099
Arenosol	0,099	0,152	0,053
Leptosol	0,099	0,152	0,053
Vertisol	0,402	0,599	0,197
Andosol	0,197	0,304	0,099

Según la anterior tabla de valores de la FAO, el valor para Vertisol crómico es de 0,599 y para Cambisol cálcico es de 0,304.

Ya que hay diferencia entre los valores de una metodología y de otra, se calculará un valor medio del factor “K” para realizar los cálculos de la MUSLE.

Realizando la media de los valores obtenidos, resultan unos valores medios para el factor “K” con valor de:

- Cambisol cálcico: $(0,599 + 1,13) / 2 = 0,865$
- Vertisol crómico: $(0,304 + 0,55) / 2 = 0,427$

Factor “K” en Cambisol cálcico: 0,865 (t/ha.m².h/hJ.cm)

Factor “K” en Vertisol crómico: 0,427 (t/ha.m².h/hJ.cm)

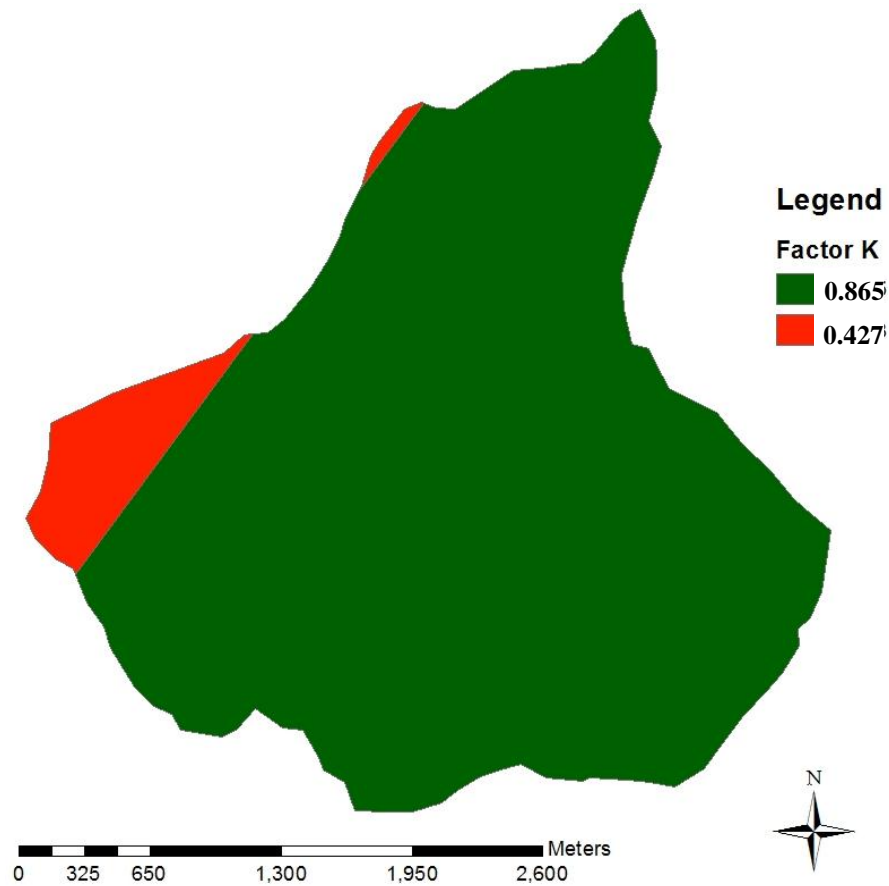


Fig. 3: Factor “K” sobre cuenca del arroyo de las Canteras (Castro del Río). (Elaboración propia)

- Superficie de Vertisol crómico: 493.787,38 m²
- Superficie de Cambisol cálcico: 8.350.863,51 m²

Se pondera la superficie que ocupa en la cuenca cada uno de los valores de “K” para obtener un valor medio de:

$$\frac{493.787.38 \cdot 0,865 + 8.350.863,51 \cdot 0,427}{8.844.650,89} = 0,45$$

Valor medio del factor “K” en la cuenca = 0,45

4.2.4. CÁLCULO FACTOR DE GRADO DE COBERTURA VEGETAL (C)

Para calcular los valores del factor “C”, o factor de grado de cobertura vegetal, se recurrirá al mapa de los usos del suelo del SIOSE para obtener los distintos tipos de cobertura que existen en la cuenca.

Cada tipo de cobertura se corresponderá con un valor diferente de factor “C”, por lo que el mapa resultante para dicho factor será igual que el de usos del suelo.

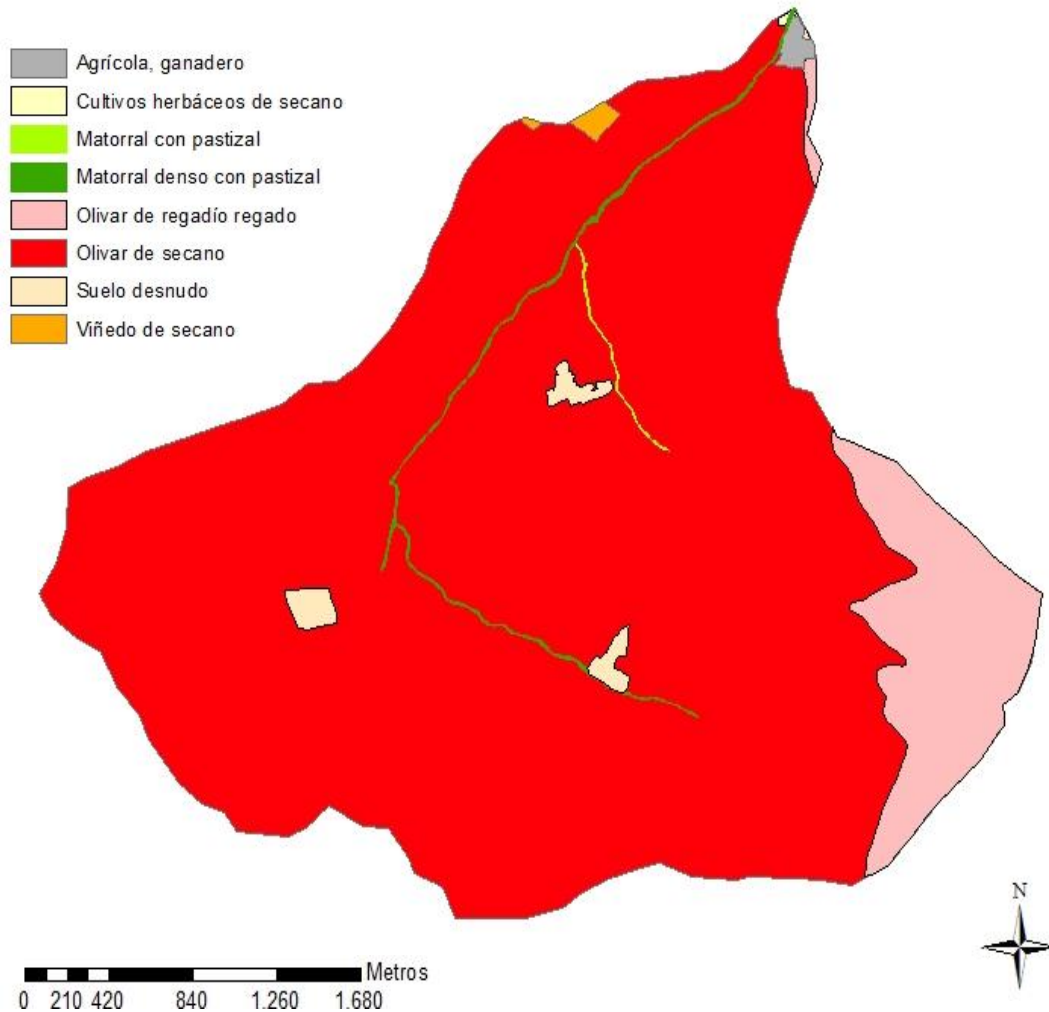


Fig. 4: Mapa de Usos del suelo de la cuenca del arroyo de las Canteras. (Elaboración propia)

Para la asignación de los distintos valores del factor vegetación se han utilizado diversas fuentes para que el resultado fuese lo más coherente posible.

Se han utilizado dos tablas diferentes, una de valores de “C” para cubierta vegetal permanente, es decir, terreno forestal (*ver tabla 3*), y otra tabla de valores de “C” para distintos cultivos existentes en los suelos andaluces (*ver tabla 4*)



Tabla 3: Valores del factor de cubierta vegetal “C”, para matorrales y vegetación permanente. Fuente: Wischmeier & Smith, 1979)

VALORES DEL FACTOR DE CUBIERTA VEGETAL (FACTOR C) PARA MATORRALES Y VEGETACIÓN PERMANENTE (1)								
Cubierta de copas		Cubierta en contacto con el suelo						
Tipo y altura (2)	% cubierta (3)	Tipo (4)	Porcentaje de suelo cubierto					
			0	20	40	60	80	95
No apreciable	0	G	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
		W	0.45	0.24	0.15	0.091	0.043	0.011
Herbáceas altas o matorral bajo, con altura media de caída de gota de lluvia 0,5 m.	25	G	0.36	0.17	0.09	0.038	0.013	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.083	0.041	0.011
	50	G	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
		W	0.26	0.16	0.11	0.076	0.039	0.011
	75	G	0.17	0.10	0.06	0.032	0.011	0.003
		W	0.17	0.12	0.09	0.068	0.038	0.011
Apreciable cubierta de matorral y arbustos con una altura media de caída de la gota de lluvia de 2 m.	25	G	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.40	0.22	0.14	0.087	0.042	0.011
	50	G	0.34	0.16	0.08	0.038	0.012	0.003
		W	0.34	0.19	0.13	0.082	0.041	0.011
	75	G	0.28	0.14	0.08	0.036	0.012	0.003
		W	0.28	0.17	0.12	0.078	0.040	0.011
Árboles, pero sin cubierta apreciable de matorral. Altura media de caída de gota de lluvia de 4-5 m.	25	G	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003
		W	0.42	0.23	0.14	0.089	0.042	0.011
	50	G	0.39	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.39	0.21	0.14	0.087	0.042	0.011
	75	G	0.36	0.17	0.09	0.039	0.012	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.084	0.041	0.011

- (1) Los valores de C sumen que la vegetación presenta una distribución aleatoria sobre el suelo
(2) La altura de copas se mide como la altura media de caída de las gotas de lluvia desde la parte aérea de la vegetación. El efecto de las copas es inversamente proporcional a dicha altura media de caída de las gotas de lluvia, siendo esta mayor de 10 m.
(3) Porción de superficie que quedaría oculta por las copas en una proyección vertical de las mismas.
(4) G: Cubierta sobre el suelo de césped o similares, restos vegetales en descomposición o humus de al menos 5 cm de espesor.
(5) W: Cubierta sobre el suelo de herbáceas de hoja ancha, con escasa extensión lateral de su sistema radical, o residuos vegetales sin descomponer.

% Cabida cubierta	% Cabida en contacto con el suelo (1)	Tipo de ordenación (2)	
		C	NC
100 - 75	100 - 90	0.001	0.003 - 0.011
75 - 40	90 - 70	0.002 - 0.003	0.01 - 0.03
40 - 20 (3)	70 - 40	0.003 - 0.009	0.03 - 0.09

- (1) Formada por al menos 5 cm de restos vegetales o plantas herbáceas
(2) C: Montes con control estricto de pastoreo
NC: Montes sin control de pastoreo
(3) Para cubiertas en contacto con el suelo inferiores al 40 % o cabida cubierta menor del 20 %, deben usarse los valores de la tabla de valores de C para pastizales, matorral y arbustos.



Para obtener los valores del factor “C” para terrenos con cultivos, se ha utilizado la tabla propuesta por la Junta de Andalucía, obtenida de “*MOREIRA, J.M. 1994*”, para los cultivos más frecuentes de la región.

Tabla 4: Valores de “C” en cultivos de suelos andaluces (Obtenida de la Junta de Andalucía).

Cultivos de secano	Factor C	Cultivos de regadío	Factor C
Trigo/avena	0.38	Algodón/algodón	0.29
Trigo/barbecho	0.44	Algodón/trigo	0.17
Trigo/garbanzo	0.60	Algodón/remolacha	0.21
Trigo/cebada	0.57	Algodón/maíz	0.51
Trigo/girasol	0.55	Algodón/girasol	0.49
Trigo/habas	0.31	Maíz/maíz	0.53
Trigo/remolacha	0.29	Maíz/remolacha	0.45
Cabada/girasol	0.63	Tabaco/tabaco	0.53
Cereal/cereal	0.31	Cereal/girasol	0.36
Cereal/barbecho	0.40	Patata/girasol	0.36
Cereal/girasol	0.70	Patata/sandía	0.36
Algodón/algodón	0.14	Arroz/arroz	0.04
Olivar	0.40	Hortalizas	0.04
Viñedo	0.54	Olivar	0.40
Almendro	0.54		

Una vez se encuentran definidos los distintos usos del suelo de la cuenca, se han asignado a cada clase los valores del factor “C” estimados, siguiendo los valores existentes en ambas tablas, se obtienen los siguientes valores para la cuenca del arroyo de las Canteras:

Tabla 5: Valores de factor “C” en la cuenca del arroyo de las Canteras. Elaboración propia

Uso del suelo	Área	Factor C	Área*C
Agrícola, ganadero	20856.69	0.8	16685.352
Cultivos herbáceos de secano	2450.78	0.4	980.312
Matorral con pastizal	5494.47	0.011	60.43917
Matorral denso con pastizal	32152.72	0.008	257.22176
Olivar de regadío regado	721627.96	0.4	288651.184
Olivar de secano	7964907.64	0.525	4181576.511
Suelo desnudo	78142.02	0.9	70327.818
Viñedo de secano	19018.61	0.54	10270.0494
	<u>8844650.89</u>		<u>4568808.887</u>

Dividiendo la suma de las áreas ponderadas por su factor “C” correspondiente entre el área total de la cuenca se obtiene un valor medio para la cuenca:

Factor “C” = 0,516

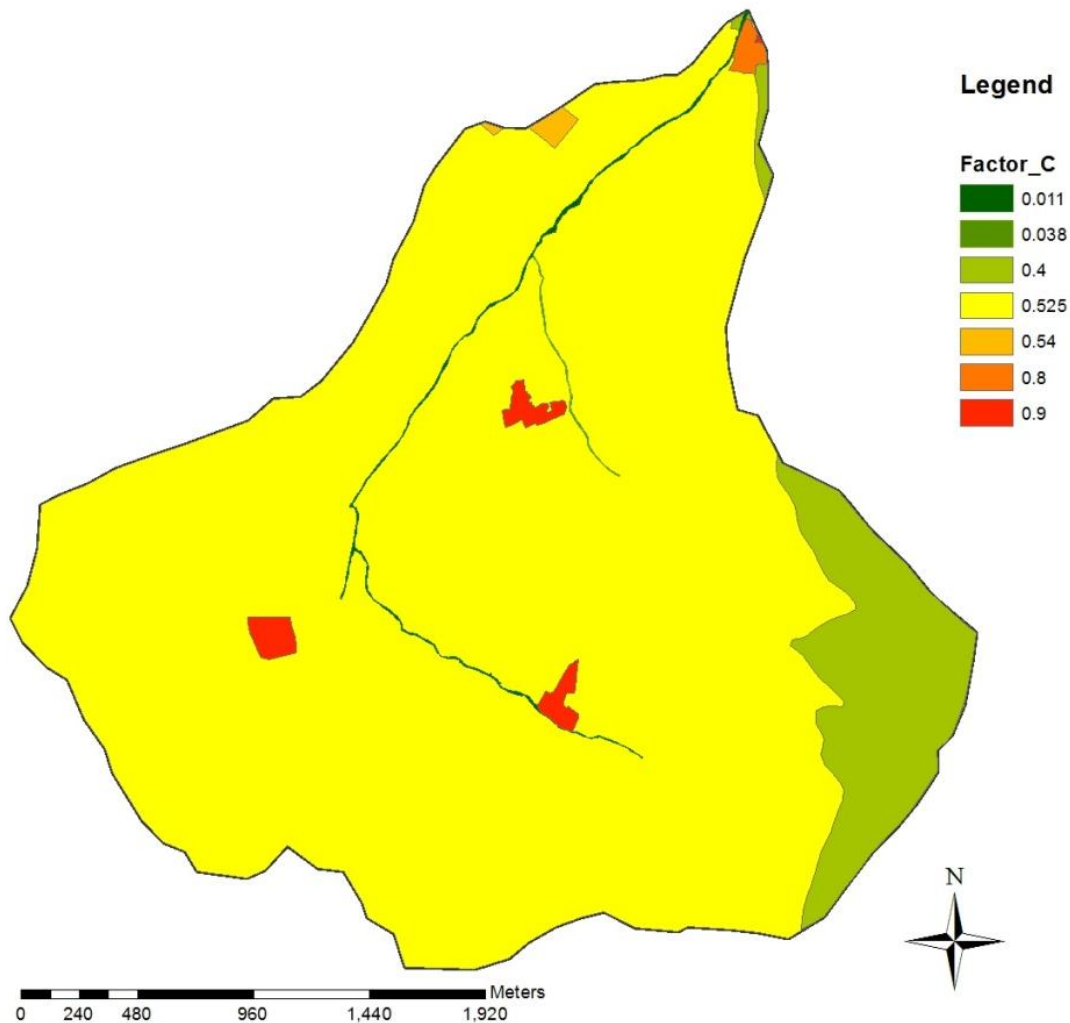


Fig. 5: Factor “C” sobre cuenca del arroyo de las Canteras. Elaboración propia

4.2.5. CÁLCULO DEL FACTOR PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN (P)

Siempre que no existan prácticas de conservación, el valor del factor “P” siempre será 1.

Esto se da en terreno forestal, zonas urbanizadas y cultivos con prácticas de laboreo a favor de máxima pendiente. Si el cultivo tiene prácticas de conservación en fajas o en terrazas, se tomarán los valores de la siguiente tabla:

Tabla 6: Valores del factor de prácticas de conservación “P”. (Fuente: Wischmeier & Smith, 1979)

PENDIENTE (%)	CULTIVO A NIVEL		CULTIVO EN FAJAS	CULTIVO EN TERRAZAS
	Factor P	Máxima longitud		
1-2	0.60	120	0.30	0.12
3-5	0.50	90	0.25	0.1
6-8	0.50	60	0.25	0.1
9-12	0.60	35	0.30	0.12
13-16	0.70	25	0.35	0.14
17-20	0.80	20	0.40	0.16
21-25	0.90	15	0.45	0.18

Debido a que no existen prácticas de conservación en ninguna zona de la cuenca, se ha asignado un valor constante de 1 para toda la cuenca.

Factor $P = 1$

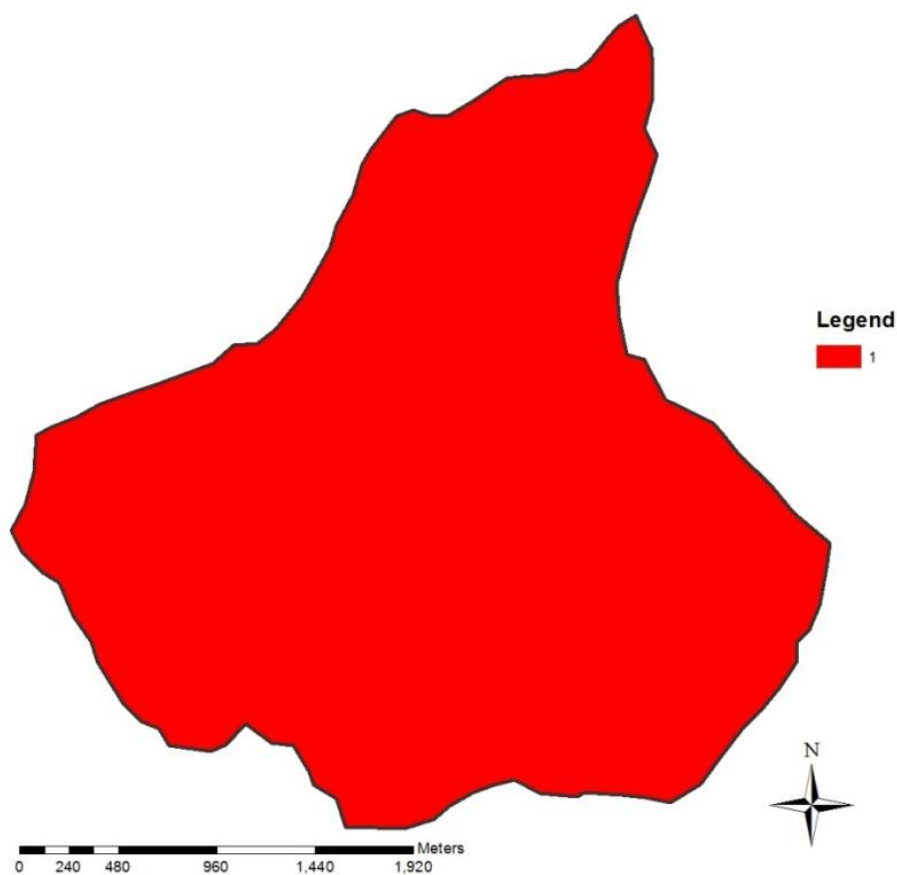


Fig. 6: Factor “P” en la cuenca del arroyo de las Canteras. Elaboración propia

4.2.6. CÁLCULO DEL FACTOR TOPOGRÁFICO (L.S)

Para el cálculo del factor “LS” mediante ArcGis se necesita partir del modelo digital del terreno (MDT tamaño de celda 5x5m).

Se procede a calcular el factor “LS” a partir del flujo acumulado y de la pendiente de cada celda según la fórmula de (B. Engel 2003):

Ecuación 3

$$LS = \left(\frac{\text{Flujo acumulado} * \text{tamaño de la celda}}{22,13} \right)^{0,4} * \left(\frac{\text{sen(pendiente)}}{0,0896} \right)^{1,3}$$

Para calcular las pendientes de la cuenca se utilizará el modelo digital del terreno de la zona de la cuenca de las Canteras (MDT 5x5 m) en ArcGis. Mediante la herramienta “slope” se calcula la inclinación en grados de cada pixel.

El resultado obtenido es el siguiente mapa de pendientes:

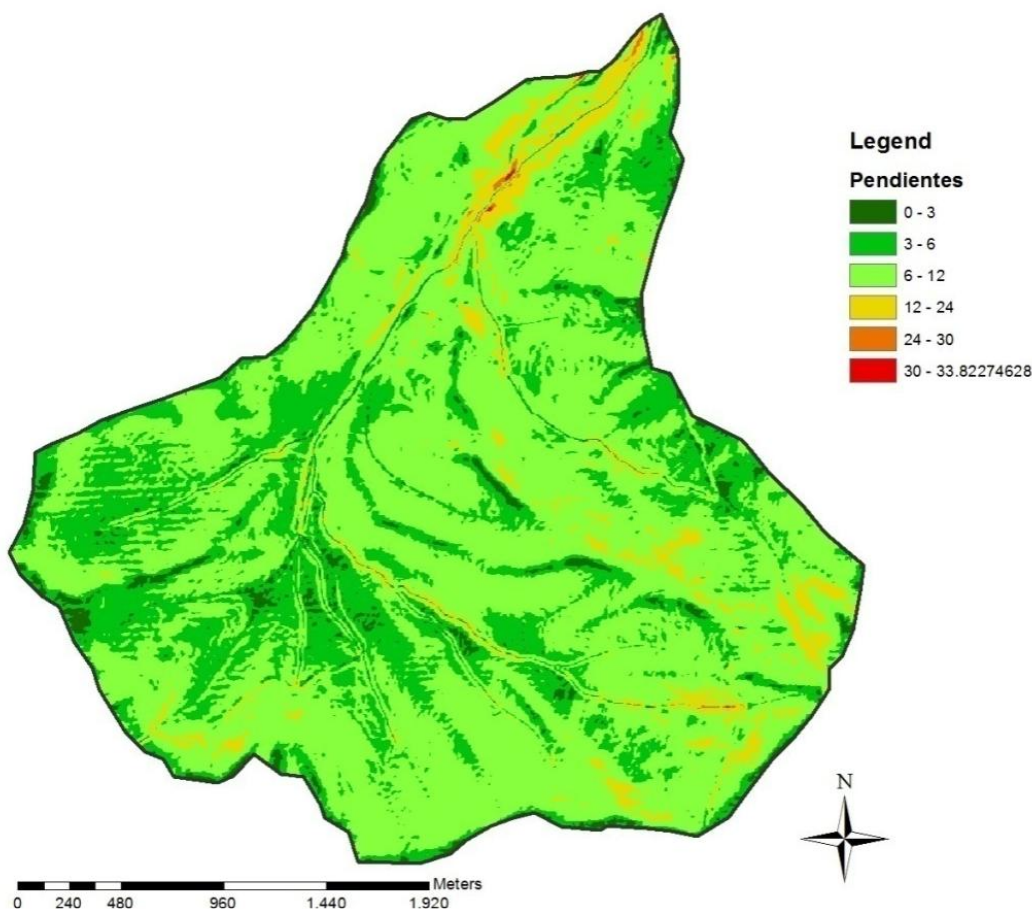


Fig. 7: Mapa de pendientes (dada en grados) de la cuenca del a. de las Canteras. Elaboración propia

A continuación, para calcular el mapa de flujo acumulado, se parte también del MDT (5x5 m).

Mediante la herramienta “flow direction” se obtiene el mapa de dirección de flujo, a partir del cual mediante la herramienta “flow accumulation” se crea el mapa de flujo acumulado utilizado.

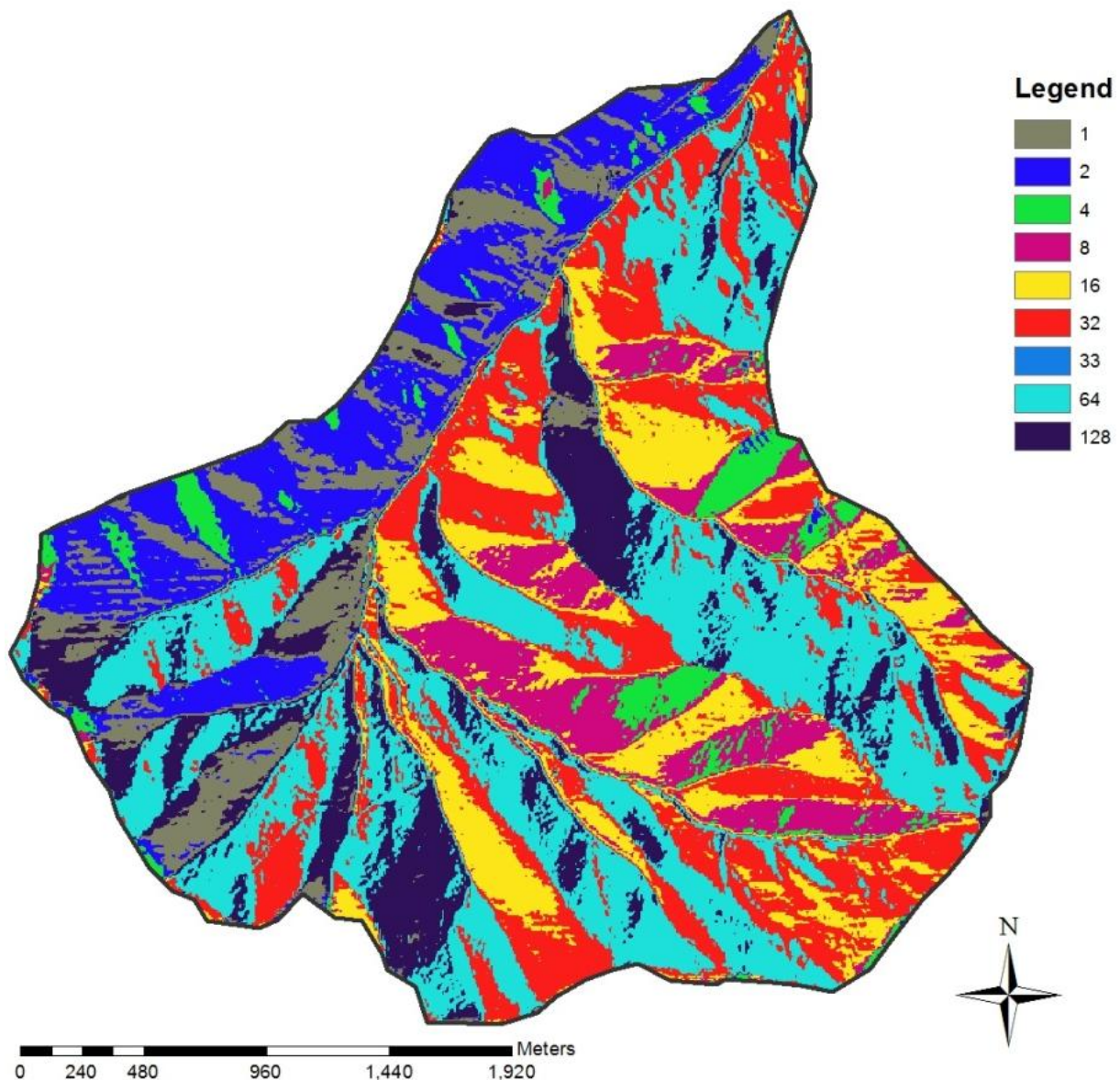


Fig. 8: Mapa de dirección del flujo en la cuenca del arroyo de las Canteras. Elaboración propia

Mapa de flujo acumulado obtenido a partir de la dirección de flujo:



Fig. 9: Mapa de acumulación de flujo en la cuenca del arroyo de las Canteras. Elaboración propia

Una vez obtenidos los valores de pendiente y acumulación de flujo para cada pixel de la cuenca del arroyo de las Canteras, se procede al cálculo del factor “LS” a partir de la fórmula indicada anteriormente, mediante la herramienta “Raster Calculator”

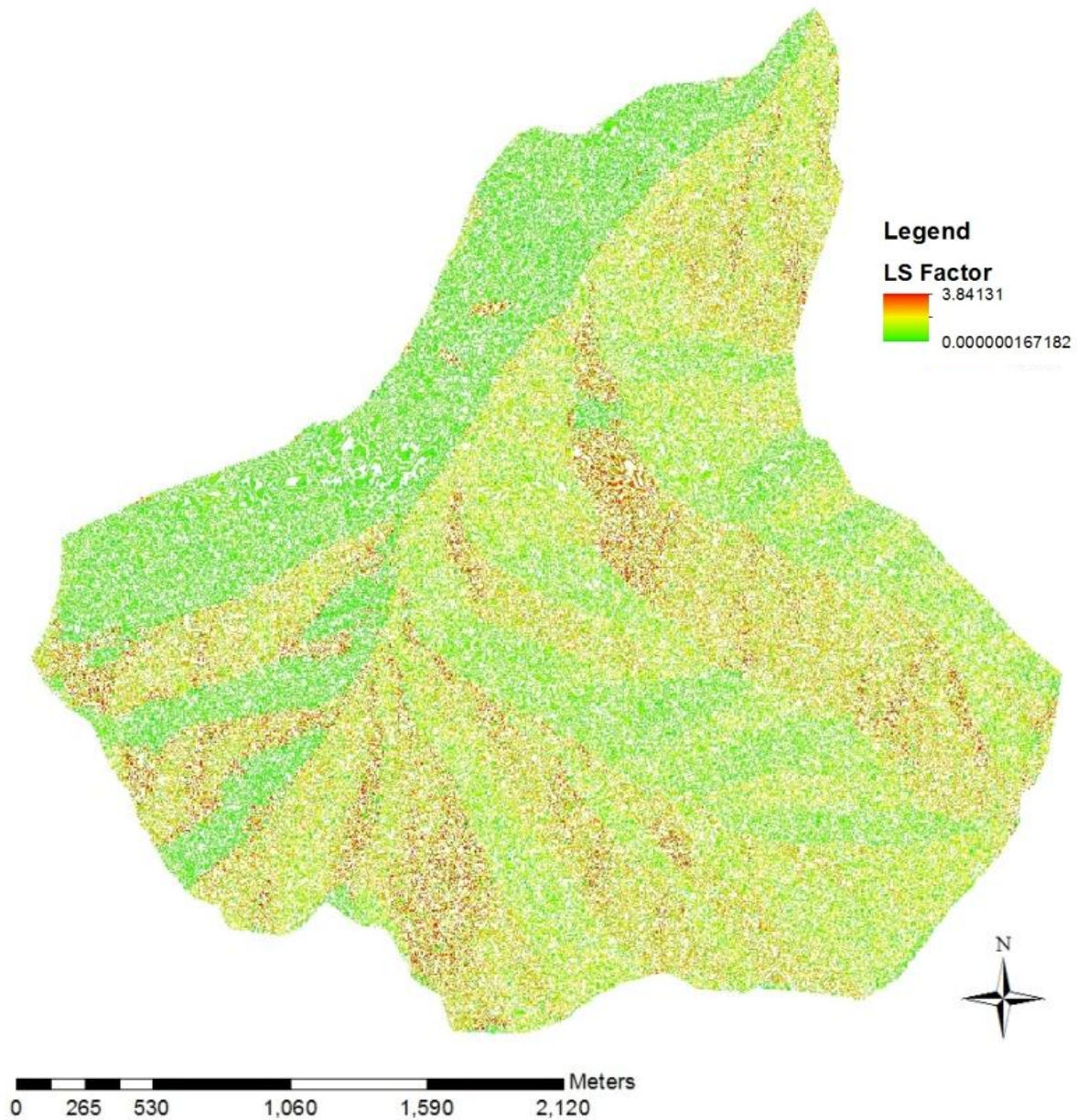


Fig. 10: Mapa de valores del factor “LS” en la cuenca del a. de las Canteras. Elaboración propia

Una vez conocidos los valores de “LS” para cada pixel que conforma la cuenca, se obtiene el valor medio que puede ser consultado mediante ArcGIS en la pestaña “Source” de las propiedades de la capa resultante de factor “LS”.

Resulta un valor para el factor topográfico “LS” con un valor de:

$$\text{Factor "LS"} = 1,22$$



4.3. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Al ser una cuenca bastante uniforme, el método MUSLE resulta más preciso al tener que calcularse con los valores medios de la cuenca.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos, se llega a la conclusión de que todo territorio está expuesto a una gran erosión. Los usos del suelo existentes son el factor clave que determina la intensidad de éste fenómeno erosivo.

5. RESULTADOS DEL MÉTODO MUSLE

Una vez obtenidos todos los factores necesarios, se procede a calcular las toneladas por aguacero (Y) producidas por una tormenta asociada a un periodo de retorno de 500 años:

$$Y = 11,8. (V. Q_p)^{0,56} . K. C. P. LS \text{ (t/aguacero)}$$

- $V = 561.870 \text{ m}^3$
- $Q_p = 53,46 \text{ m}^3/\text{s}$
- $K = 0.45$
- $C = 0.516$
- $P = 1$
- $LS = 1,22$

$$Y = 11,8. (V. Q_p)^{0,56} * 0,283284 = 51.475 \text{ toneladas / aguacero}$$

Una vez calculadas las toneladas emitidas por aguacero, se calcula el volumen que ocupan para saber el volumen total del caudal líquido + sólido en el estudio de inundabilidad.

La tierra húmeda tiene un peso específico de 1850 kg/m^3 . Calculando la proporción de las toneladas obtenidas, se obtiene un volumen de sedimentos de:

$$\text{Volumen de sedimentos emitidos por aguacero} = \frac{51.475 \text{ tn} * 1000 \text{ kg}}{1850 \text{ kg/m}^3}$$

$$\text{Volumen de sedimentos} = 27.824 \text{ m}^3$$



6. CONCLUSIONES

A pesar de que la MUSLE se contemple como un método sencillo a la hora de calcular la cantidad de sedimentos emitidos en una cuenca para un aguacero determinado, hay que tener en cuenta que el modelo aquí expuesto podría generar datos más precisos si las fuentes con las que se alimenta el modelo fuesen más exactas. La escasa disponibilidad de datos y la ausencia de trabajo de campo no han permitido realizar un estudio de mayor detalle, que hubiese generado resultados mucho más fiables.

A la vista de los resultados obtenidos la cuenca del arroyo de las Canteras presenta un conjunto de características naturales que la configuran como una zona de gran erosión hídrica.

Para realizar los estudios de inundabilidad, será necesario tener en cuenta dicho volumen de sedimentos generado ya que son un gran porcentaje del caudal que desemboca en el tramo de estudio. Sin embargo, las altas velocidades que se producen en el tramo de estudio evitan que en esos episodios se produzca sedimentación en el cauce y el caudal tenga más poder erosivo.

ANEJO N° 4

**PROPUESTA DE SOLUCIONES TÉCNICAS Y
JUSTIFICACIÓN**

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
2. ZONA CONFLICTIVA	5
3. ALTERNATIVAS CON MEDIDAS ESTRUCTURALES EN EL TRAMO	6
3.1. Para un caudal de periodo de retorno de 500 años	6
3.1.1. Alternativa 1: Aumento de la altura del muro	6
3.1.2. Alternativa 2: Restauración el antiguo cauce	7
3.1.3. Alternativa 3: Retirada del hormigón y redimensionamiento del cauce actual	10
3.1.4. Alternativa 4: Modificación del trazado y creación de saltos	23
3.1.5. Alternativa 5: Modificación del trazado y creación de saltos (opción 2)	25
3.2. Para un caudal de periodo de retorno de 100 años	26
3.2.1. Alternativa 6: Alterativa 4 con caudal T100	26
4. ALTERNATIVAS CON MEDIDAS ESTRUCTURALES FUERA DEL TRAMO	29
4.1. Instalación de diques de laminación	29
4.2. Creación de una llanura de inundación artificial	30
5. ALTERNATIVAS CON MEDIDAS NO ESTRUCTURALES	31
5.1. Modificación de los usos del suelo	32
6. RESUMEN DE ALTERNATIVAS	40
7. CONCLUSIONES	43
Resultados HEC-RAS de la modelización de la alternativa 3	45
Resultados HEC-RAS de la modelización de la alternativa 4	59
Resultados HEC-RAS de la modelización de la alternativa 5	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1: Detalle en planta.	5
Fig. 2: Detalle de la modelización en perfil de la zona conflictiva.	5
Fig. 3: Detalle del desbordamiento en el perfil 220 con altura de muro actual.	6
Fig. 4: Ortofoto del tramo antes de canalizar. 1956.....	7
Fig. 5: Ortofoto del tramo (15/08/2002).	8
Fig. 6: Ortofoto del tramo (31/10/2004).	8
Fig. 7: Ortofoto del tramo (24/06/2013)..	9
Fig. 8: Comparación de cauce natural y cauce canalizado.....	9
Fig. 9: Espacio máximo disponible para aumentar secciones..	13
Fig. 10: Planta con distribución de nuevos perfiles..	14
Fig. 11: Perfil tipo para el tramo comprendido entre las secciones 450 y 300.	15
Fig. 12: Perfil tipo para el tramo comprendido entre las secciones 290 y 250.	15
Fig. 13: Nuevo diseño de la curva del canal (en azul oscuro).	16
Fig. 14: Variación del trazado en planta.	17
Fig. 15: Perfil tipo para el tramo comprendido entre las secciones 240 y 140.	19
Fig. 16: Perfil tipo para el tramo comprendido entre las secciones 130 y 20.	20
Fig. 17: Pendiente del tramo antes de la actuación.	21
Fig. 18: Pendiente del tramo después de la actuación.....	21
Fig. 19: Velocidades del tramo después de la actuación.	23
Fig. 20: Pendiente del tramo después de la actuación.....	24
Fig. 21: Gráfico de velocidades del tramo después de la actuación.....	24
Fig. 22: Gráfico de “n” de Manning en el tramo después de la actuación..	25
Fig. 23: Esquema de dissipador de energía aguas abajo del salto.....	25
Fig. 24: Perfil del tramo de la alternativa 4 con Q_{T100} . Obtenido de HEC-RAS.....	26
Fig. 25: Comparación de velocidades en el tramo de la alternativa 4 con Q_{T100}	27
Fig. 26: Comparación de n° de Froude en el tramo de la alternativa 4 con Q_{T100}	27
Fig. 27: Tramo aguas arriba de la zona de actuación del arroyo de las Canteras.....	31
Fig. 28: Mapa de Usos del suelo de la cuenca del arroyo de las Canteras.	33
Fig. 29: Mapa de pendientes reclasificadas según riesgos de erosión.....	34
Fig. 30: Imagen objetivo de bosque de encina en pendiente.....	35
Fig. 31: Imagen objetivo de pastizal con arbolado disperse.....	35
Fig. 32: Olivar en terrazas con vegetación permanente.	36
Fig. 33: Olivar con vegetación espontánea.....	36
Fig. 34: Olivar con calles de vegetación perpendiculares a la pendiente.	37
Fig. 35: Olivar a suelo desnudo.	37

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Recopilación de valores de n de Manning.</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 2: Resultados de la modelización del tramo después de la actuación para un caudal asociado a un periodo de retorno de 500 años.</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 3: Velocidades máximas de agua admisibles para distintos materiales.</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 4: Pendiente máxima admisible en las tierras de cultivo.</i>	<i>33</i>

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1: Radio mínimo necesario para la curva de un canal.....</i>	<i>16</i>
<i>Ecuación 2: Incremento del nivel del agua en la parte exterior de la curva de un canal.....</i>	<i>18</i>
<i>Ecuación 3: Volumen de escorrentía producido en la cuenca por un aguacero determinado.....</i>	<i>38</i>
<i>Ecuación 4: Cantidad de sedimentos emitidos en la cuenca por un aguacero determinado</i>	<i>39</i>

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este proyecto es encontrar una solución a los problemas de falta de naturalidad e inundabilidad que se producen por la canalización de los últimos 440 metros del arroyo de las Canteras, a su paso por la localidad de Castro del Río. Ya que se requiere la retirada de toda la solera de hormigón existente en el tramo, este anejo hace hincapié en los problemas de erosión, estabilidad de la obra y desbordamientos.

En primer lugar, se ha intentado solucionar el problema con medidas estructurales dentro del tramo problemático y, en segundo lugar, se ha recurrido a las medidas estructurales fuera del mismo y a las no estructurales a nivel de cuenca.

2. ZONA CONFLICTIVA

Según el estudio hidráulico del trazado actual del canal, recogido en el *anejo 2: "Estudio hidrológico e hidráulico"*, la zona del canal que presenta problemas de desbordamientos es la localizada en la zona posterior a la curva debido a una disminución de la velocidad y a la fuerza centrífuga que se produce, entre las secciones 180 y 220.



Fig. 1: Detalle en planta. Obtenido de HEC-RAS

En la siguiente figura se observa el detalle del resultado de la modelización en HEC-RAS de la zona conflictiva en la que el nivel del agua supera la parte superior del canal.

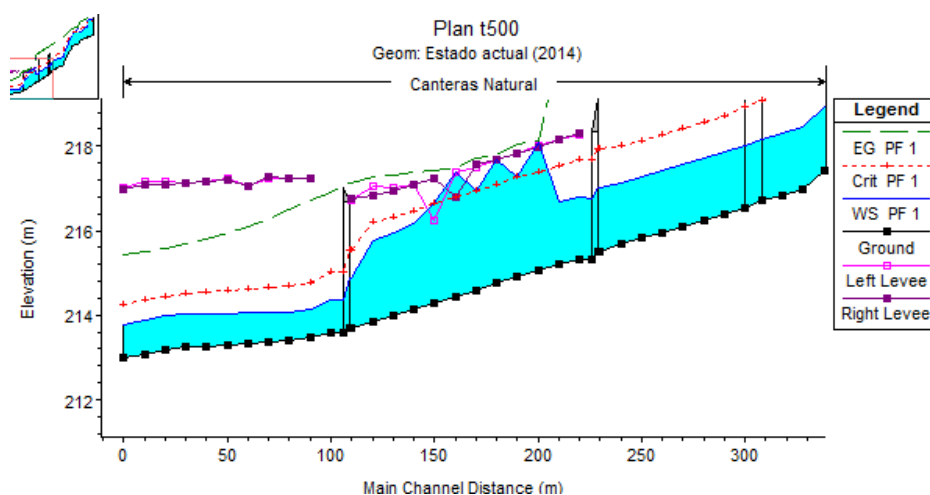


Fig. 2: Detalle de la modelización en perfil de la zona conflictiva. Obtenido de HEC-RAS



3. ALTERNATIVAS CON MEDIDAS ESTRUCTURALES EN EL TRAMO

Para solucionar este problema de desbordamientos, se han diseñado 6 alternativas diferentes según el caudal máximo circulante:

- **Para un caudal de periodo de retorno de 500 años:**
 - Alternativa 1: Aumento de la altura del muro
 - Alternativa 2: Restauración del antiguo cauce
 - Alternativa 3: Retirada del hormigón y redimensionamiento del cauce actual
 - Alternativa 4: Modificación del trazado y creación de saltos
 - Alternativa 5: Modificación del trazado y creación de saltos (Opción 2)
- **Para un caudal de periodo de retorno de 100 años:**
 - Alternativa 6: Alternativa 4 con caudal T100

3.1. PARA UN CAUDAL DE PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS

Se ha propuesto distintas alternativas que permiten evacuar el caudal asociado a un periodo de retorno de 500 años sin desbordamientos:

3.1.1. ALTERNATIVA 1: AUMENTO DE LA ALTURA DEL MURO

La alternativa más sencilla para evitar el desbordamiento en la zona consiste en el aumento de la altura y grosor del muro del canal. En la siguiente figura se observa el primer perfil correspondiente a la zona posterior a la curva donde la cota de lámina de agua supera está por encima del límite del muro y este comienza a desbordarse ya que no abarca el caudal del periodo de retorno de 500 años.

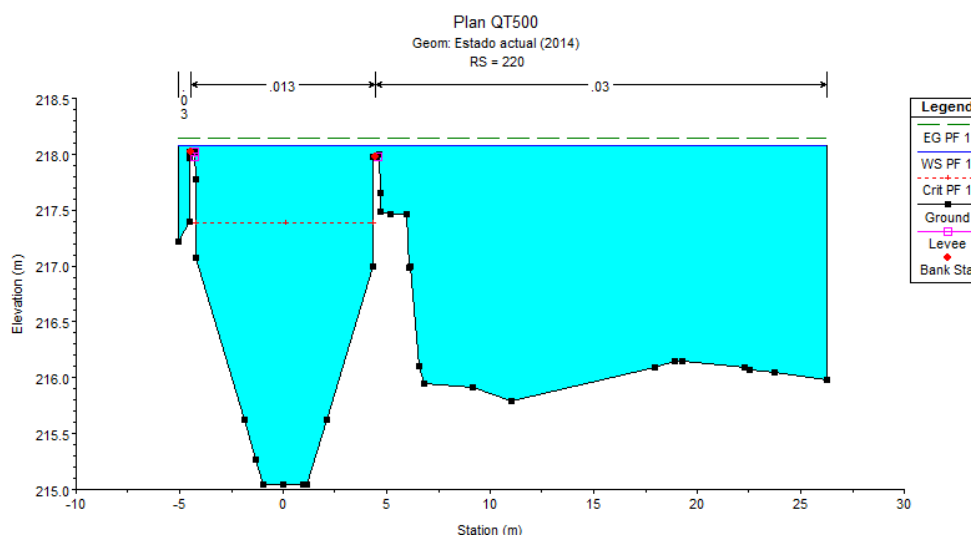


Fig. 3: Detalle del desbordamiento en el perfil 220 con altura de muro actual. Obtenido de HEC-RAS

Simplemente elevando el muro 30 cm durante los 40 metros problemáticos es suficiente para que al realizar la modelización con HEC-RAS no se desborde el canal.



Esta solución alternativa, a pesar de ser la más económica y rápida de ejecutar, traslada el problema aguas abajo y estética y ecológicamente no es una solución adecuada. No se pretende únicamente evitar el desbordamiento en esa zona debido a que en la restauración, el factor ambiental tiene un peso importante.

3.1.2. ALTERNATIVA 2: RESTAURACIÓN EL ANTIGUO CAUCE

Una alternativa que suele ser eficaz en la restauración de ríos y arroyos que se encuentran canalizados consiste en llevar el caudal por su antiguo cauce, es decir, el cauce original que coincide con la cota de terreno más baja y hacia donde confluye el agua de forma natural. Este antiguo cauce del arroyo de las Canteras fue desplazado con la creación del canal. Para poder saber donde se encontraba, se ha recurrido a la búsqueda de una ortofotografía aérea anterior a la creación del canal.

La ortofoto más antigua disponible corresponde a la del vuelo americano de 1956, en ella se ha delimitado el antiguo cauce del arroyo de las Canteras (en azul).

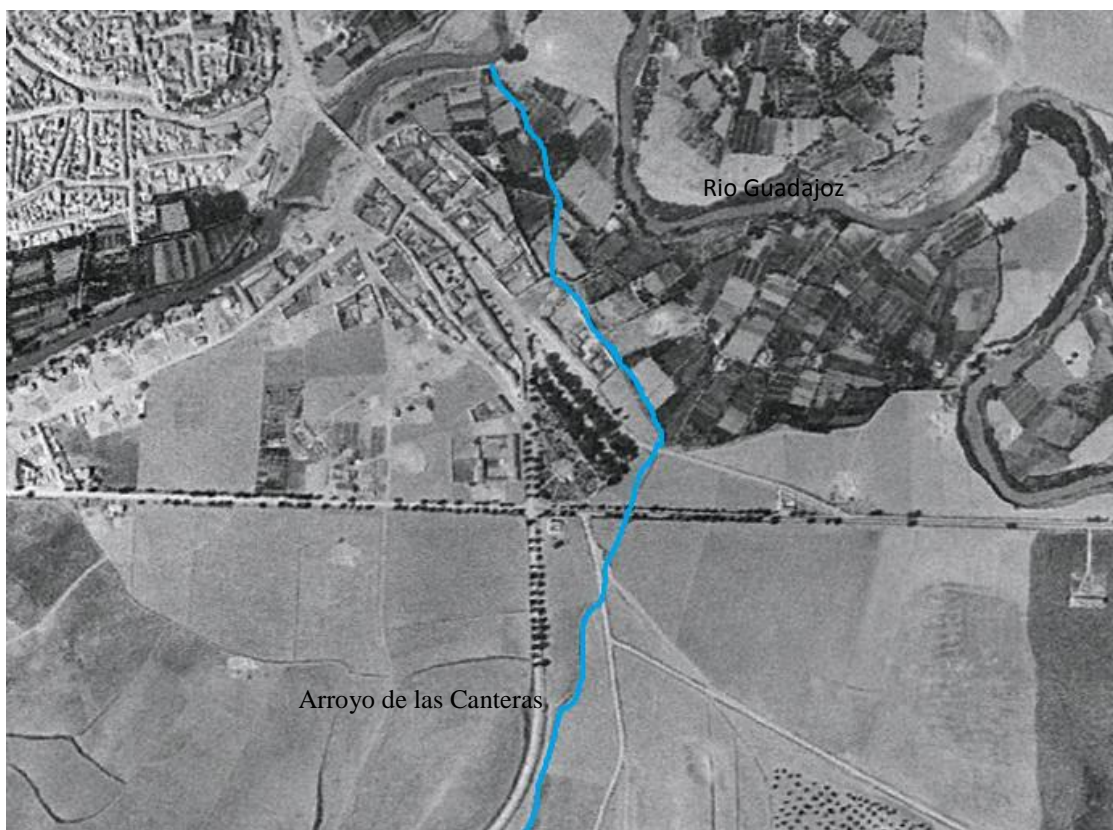


Fig. 4: Ortofoto del tramo antes de canalizar. Vuelo americano de 1956

Se observa que antiguamente el cauce discurría bastante más a la izquierda que el trazado actual de la canalización. En la siguiente ortofoto del 2002 el canal ya está construido. Se observa el trazado modificado del arroyo (en rojo).



Fig. 5: Ortofotografía del tramo (15/08/2002). Fuente: Google Earth

En la siguiente fotografía se observa que el canal sigue en el mismo lugar. Por otro lado se observa claramente la dinámica del meandro del río Guadajoz señalado en azul en la fotografía de la *Fig.5*.



Fig. 6: Ortofotografía del tramo (31/10/2004). Fuente: Google Earth

La siguiente ortofotografía es la más reciente e indica el estado actual de la zona.



Fig. 7: Ortofoto del tramo (24/06/2013). Fuente: Google Earth.

A continuación se comparan el trazado del antiguo cauce (en rojo) con el trazado actual del cauce canalizado (en negro) sobre la ortofoto más actual del 2013.



Fig. 8: Comparación de cauce natural y cauce canalizado. Fuente: Google Earth



Observando la fotografía de la *Fig.8* se puede apreciar que no se puede devolver al arroyo su trazado natural ya que el antiguo cauce se encuentra actualmente urbanizado. Se descarta la opción de recuperarlo y se debe recurrir a otra solución.

3.1.3. ALTERNATIVA 3: RETIRADA DE HORMIGÓN Y REDIMENSIONAMIENTO DEL CAUCE ACTUAL

Con la retirada de la solera del canal, el terreno se queda desprotegido contra la erosión producida por las altas velocidades del agua, por lo tanto, hay que redimensionar el cauce tanto para poder hacer frente a este problema como para evitar los desbordamientos.

A la hora de modificar un cauce se pueden realizar 3 tipos de cambios: modificar las secciones, modificar el trazado en planta y modificar la pendiente.

MODIFICACIÓN DE LAS SECCIONES Y TRAZADO EN PLANTA

Para poder solucionar el problema de los desbordamientos, y a la vez poder retirar el hormigón del canal para dotar al tramo de cierta naturalidad, es necesario aumentar la sección y tender los taludes para disminuir la velocidad, el calado y el cortante para evitar una elevada erosión, teniendo que proteger además lecho y taludes con los medios adecuados.

CAMBIO DE RUGOSIDAD

Para diseñar las nuevas secciones se ha partido de la simulación en HEC-RAS del estado actual del canal. Partiendo de ese modelado, para la creación de una nueva geometría, en primer lugar se han eliminando los 20 cm de grosor de hormigón existentes y se ha cambiado la rugosidad, escogiendo una n de Manning para lecho y taludes según la siguiente tabla:

Tabla 1: Recopilación de valores de n de Manning, Obtenido de “Open-Channel Hydraulics” [Chow, 1959].

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
Natural streams - minor streams (top width at flood stage < 100 ft)			
1. Main Channels			
a. Clean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f. Same as "d" with more stones	0.045	0.050	0.060



g. Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stand of timber and underbrush	0.075	0.100	0.150
2. Mountain streams, no vegetation in channel, banks usually steep, trees and brush along banks submerged at high stages			
a. Bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
b. Bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070
3. Floodplains			
a. Pasture, no brush			
1. Short grass	0.025	0.030	0.035
2. High grass	0.030	0.035	0.050
b. Cultivated areas			
1. No crop	0.020	0.030	0.040
2. Mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. Mature field crops	0.030	0.040	0.050
c. Brush			
1. Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. Light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. Light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. Medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. Medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d. Trees			
1. Dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200
2. Cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
3. Same as above, but with heavy growth of sprouts	0.050	0.060	0.080
4. Heavy stand of timber, a few down trees, little undergrowth, flood stage below branches	0.080	0.100	0.120
5. Same as 4. with flood stage reaching branches	0.100	0.120	0.160
4. Excavated or Dredged Channels			
a. Earth, straight, and uniform			
1. Clean, recently completed	0.016	0.018	0.020
2. Clean, after weathering	0.018	0.022	0.025
3. Gravel, uniform section, clean	0.022	0.025	0.030
4. With short grass, few weeds	0.022	0.027	0.033
b. Earth winding and sluggish			
1. No vegetation	0.023	0.025	0.030
2. Grass, some weeds	0.025	0.030	0.033
3. Dense weeds or aquatic plants in deep channels	0.030	0.035	0.040
4. Earth bottom and rubble sides	0.028	0.030	0.035
5. Stony bottom and weedy banks	0.025	0.035	0.040



6. Cobble bottom and clean sides	0.030	0.040	0.050
c. Dragline-excavated or dredged			
1. No vegetation	0.025	0.028	0.033
2. Light brush on banks	0.035	0.050	0.060
d. Rock cuts			
1. Smooth and uniform	0.025	0.035	0.040
2. Jagged and irregular	0.035	0.040	0.050
e. Channels not maintained, weeds and brush uncut			
1. Dense weeds, high as flow depth	0.050	0.080	0.120
2. Clean bottom, brush on sides	0.040	0.050	0.080
3. Same as above, highest stage of flow	0.045	0.070	0.110
4. Dense brush, high stage	0.080	0.100	0.140

Los valores seleccionados para dar una nueva rugosidad en la modelización para lecho y taludes son los siguientes:

- **Lecho:** se eliminará el hormigón y se dejará el lecho en terreno natural sin vegetación, el valor de n de Manning será 0,028, “Dragline-excavated or dredged” - No vegetation
- **Taludes:** ya que se quieren plantar algunos arbustos y árboles en poca densidad, se elegirá el valor de n de Manning: 0,05, “Brush” – Light brush and trees.

Una vez escogidos los valores de la n de Manning, se ha realizado la modelización con estos valores sobre las nuevas secciones con el caudal asociado al periodo de retorno de 500 años.

Posteriormente, se ha ido aumentando la sección conforme a la disponibilidad de espacio existente en cada margen, observando la ortofoto y contrastando con el catastro y la toma de datos en campo.

Se ha ido modelizando con dicho caudal con cada cambio en las secciones hasta que se ha llegado al resultado óptimo, descrito detalladamente en el siguiente apartado: *Obtención de la nueva geometría.*

Por otro lado, se ha creado un lecho de aguas bajas para mantener una cierta altura de la cota de lámina de agua y poder mantener en mejores condiciones la vida acuática en periodos de poco caudal.

El espacio disponible es el que se puede observar en la siguiente ortofoto:



Fig. 9: Espacio máximo disponible para aumentar secciones. Elaboración propia.

OBTENCIÓN DE LA NUEVA GEOMETRÍA

Los resultados de la modificación del cauce según los cambios establecidos se han obtenido en su totalidad con HEC-RAS, con ellos se ha comprobado su viabilidad frente a posibles inundaciones producidas con el caudal asociado al periodo de retorno de 500 años.

Para el nuevo trazado, se han diseñado 4 secciones tipo diferentes en función de la zona en la que se encuentran, la altura de lámina de agua y el espacio disponible. Para la obtención del diseño óptimo de estos, se ha seguido la técnica de prueba y error, modelizando con distintos modelos hasta obtener los diseños definitivos.

La primera sección tipo se ha asignado entre la sección 450 hasta la 300, la segunda entre la 290 y la 250, la tercera entre la 240 y la 140, y finalmente la cuarta, desde la sección 130 hasta el final del canal, en su desembocadura en el río Guadajoz.

A continuación se muestran las distintas secciones localizadas en el trazado en planta:

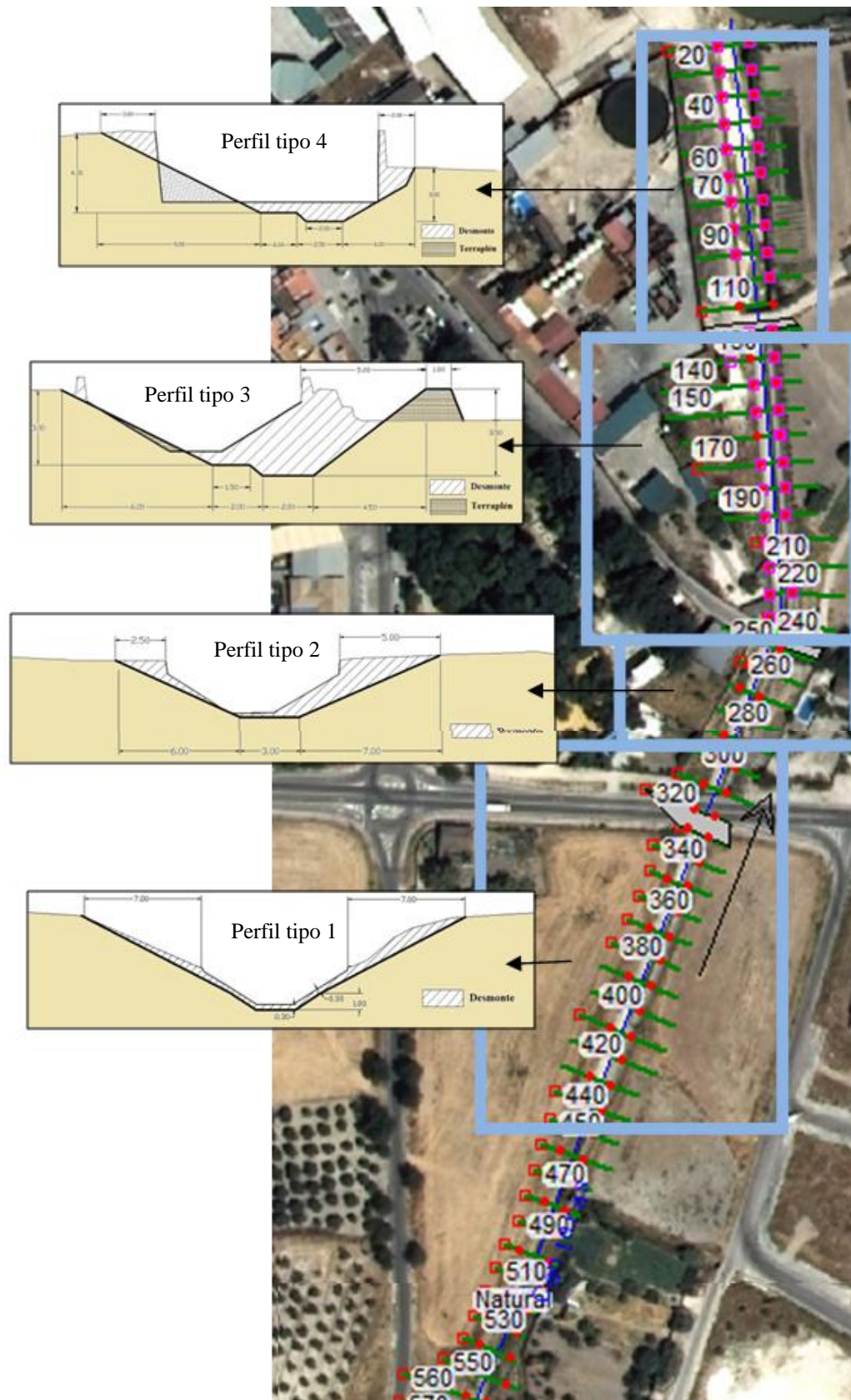


Fig. 10: Planta con distribución de nuevos perfiles. Elaboración propia.

PERFIL TIPO 1

En primer lugar, la modificación de los primeros 160 metros del canal (empezando aguas arriba) ha diseñado conforme el siguiente esquema:

Desde la sección 450 hasta la 300, es decir, los 160 primeros metros del canal, se realizará el desmante de los taludes una vez retirado el hormigón según la siguiente figura:

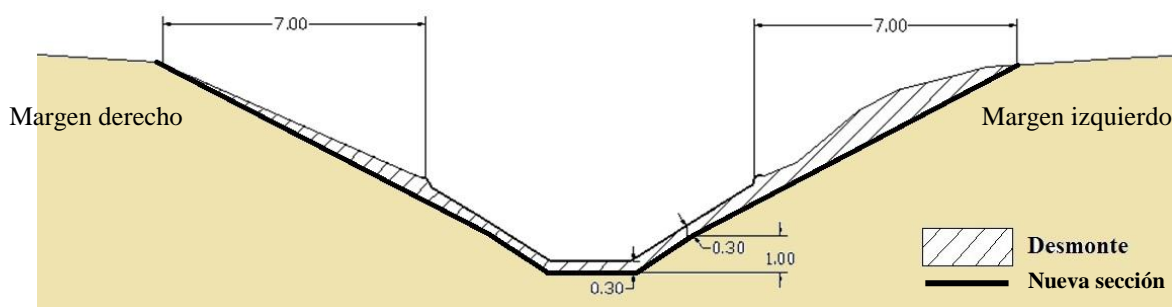


Fig. 11: Perfil tipo para el tramo comprendido entre las secciones 450 y 300. Elaboración propia

PERFIL TIPO 2

A continuación, desde el 290 hasta el 250, la nueva sección se ensanchará desplazándose ligeramente a la derecha ya que es el margen que dispone de más espacio aprovechable.

El nuevo perfil se corresponde con el siguiente esquema:

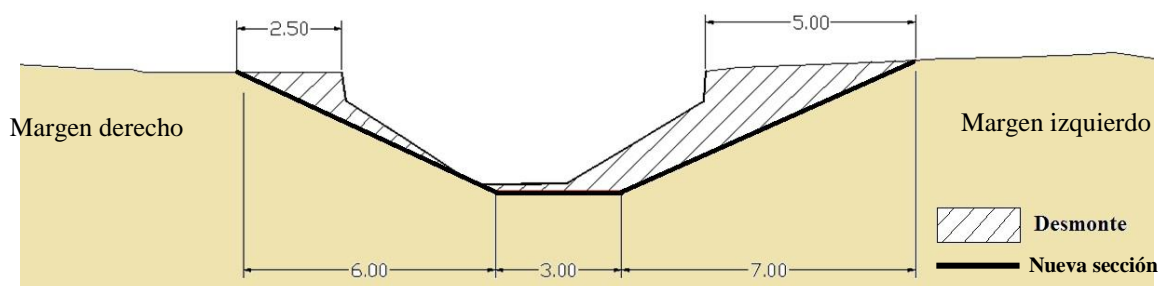


Fig. 12: Perfil tipo para el tramo comprendido entre las secciones 290 y 250. Elaboración propia

*Entre las secciones 250 y 240 se hará la transición entre este perfil tipo y el siguiente para dar continuidad al tramo

CURVA

Una vez pasado el puente, ya que la curva del canal es problemática con respecto a los desbordamientos, se dará un nuevo trazado en planta ampliando al máximo posible el



radio de la curva para una mayor seguridad en cuanto a la protección frente a desbordamientos.

Ya que el cambio de dirección es inevitable en este canal, hay que diseñar el nuevo radio que tendrá la curva según la siguiente expresión para régimen supercrítico obtenida de Blair F., E. (1965):

Ecuación 1

$$R_{0\text{mín}} = \frac{4 \cdot V^2 \cdot B}{g \cdot y}$$

**y: profundidad del flujo. (m)*

**C: coeficiente que depende del tipo de régimen de flujo en el canal y la sección transversal del canal*

**V: velocidad media en el Canal aguas arriba (m/s)*

**B: ancho medio del Canal (m)*

** $R_{0\text{mín}}$: radio de la curva, medido con respecto al eje del Canal. (m)*

Sustituyendo los siguientes valores del canal ha resultado el siguiente radio mínimo necesario:

V: 8 m/s

B: 5,35 m

y: 2 m

$$R_{0\text{mín}} = 70 \text{ metros}$$

- ALTERNATIVA CURVA 1

Para dar cierto margen de seguridad se ha diseñado una nueva curva de 100 metros de radio, indicada en la siguiente figura:

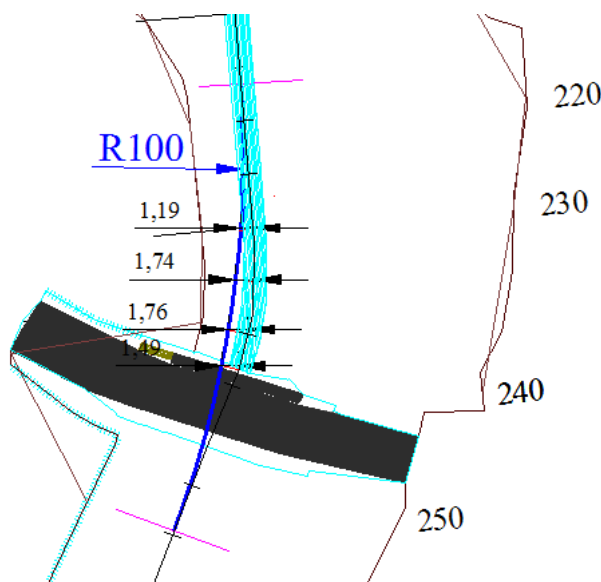


Fig. 13: Nuevo diseño de la curva del canal (en azul oscuro). Elaboración propia



Esta nueva curva sería la ideal para solventar el problema, sin embargo no se puede realizar ya que afecta a la estructura del puente y no se dispone de terreno disponible a la izquierda del cauce para poder desplazarlo hacia ese lado.

- **ALTERNATIVA CURVA 2**

Como alternativa a la anterior curva, se ha modificado no solo el radio de la curva, sino que se ha desplazado el tramo posterior ligeramente a la derecha para generar varias curvas consecutivas con radio mucho mayor para generar unas condiciones de flujo más uniformes. Las características de dichas curvas son las siguientes:

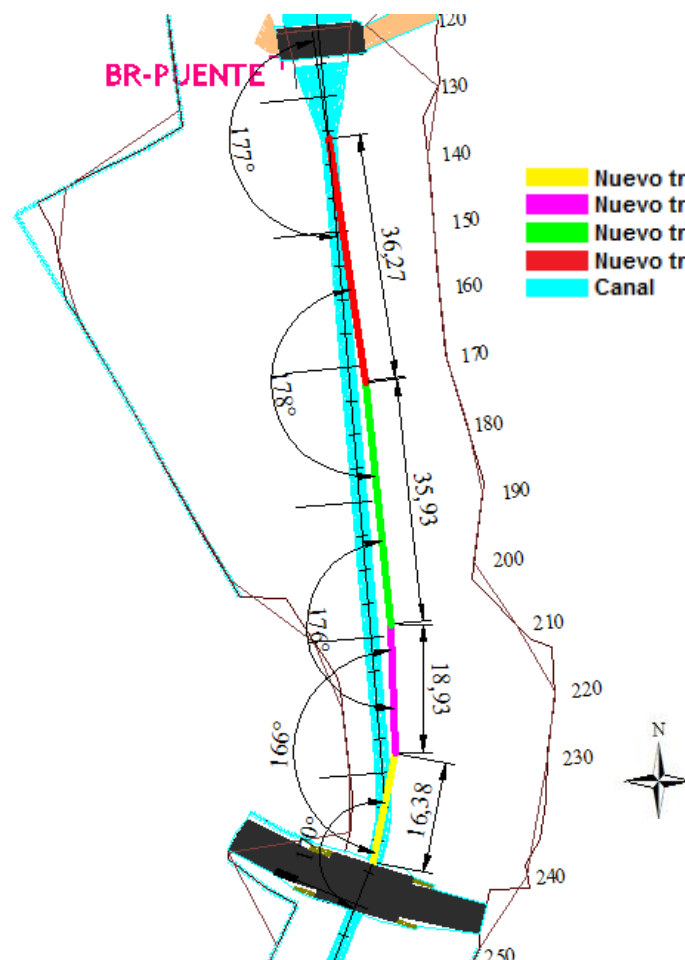


Fig. 14: Variación del trazado en planta. Elaboración propia

- Entre el cauce antiguo del canal y trazado del nuevo tramo 1 hay una curva de 200 m de radio
- Entre el trazado del nuevo tramo 1 y el nuevo tramo 2 hay una curva de 100 m de radio
- Entre el trazado del nuevo tramo 2 y el nuevo tramo 3 hay una curva de 160 m de radio
- Entre el trazado del nuevo tramo 3 y el nuevo tramo 4 hay una curva de 300 m de radio



- Entre el trazado del nuevo tramo 4 y el trazado antiguo del canal hay una curva de 300 m de radio

(Se puede observar el comportamiento del agua y la elevación de la lámina de agua en la *fig.17.*)

Para comprobar matemáticamente funcionamiento de las nuevas curvas es necesario calcular la sobreelevación del agua en cada una de ellas. Para ello, hay que utilizar la siguiente fórmula propuesta por El Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos:

Ecuación 2

$$\Delta y = C \cdot \frac{V^2 \cdot B}{g \cdot R_0}$$

** Δy : sobreelevación con respecto a la superficie libre horizontal. (m)*

**C: coeficiente que depende del tipo de régimen de flujo en el canal y la sección transversal del canal*

**V: velocidad media en el Canal (m/s)*

**B: ancho del Canal (m)*

** R_0 : radio de la curva, medido con respecto al eje del Canal. (m)*

El efecto de la sobreelevación generada por las curvas en canales es mayor para las condiciones supercríticas del flujo debido a las mayores velocidades presentes en este tipo de régimen. Esto se queda representado en el valor de “C” según el tipo de régimen para secciones rectangulares o trapezoidales:

C (Régimen subcrítico): 0,5

C (Régimen supercrítico): 1,0

SOBREELEVACIÓN DEL AGUA EN LA CURVA CREADA ENTRE EL TRAZADO ANTIGUO DEL CANAL Y EL NUEVO TRAMO 1:

C: 1,0 (adimensional)

V: 5 m/s

B: 9,5 m

R_0 : 200 m

$$\Delta y = 0,12 \text{ metros}$$

SOBREELEVACIÓN DEL AGUA EN LA CURVA CREADA ENTRE EL NUEVO TRAMO 1 Y EL NUEVO TRAMO 2:

C: 1,0 (adimensional)

V: 5 m/s

B: 9,25 m

R_0 : 100 m

$$\Delta y = 0,23 \text{ metros}$$

SOBREELEVACIÓN DEL AGUA EN LA CURVA CREADA ENTRE EL NUEVO TRAMO 2 Y EL NUEVO TRAMO 3:

C: 1,0 (adimensional)



V: 5 m/s
B: 9,25 m
R₀: 160 m

$$\Delta y = 0,14 \text{ metros}$$

SOBREELEVACIÓN DEL AGUA EN LA CURVA CREADA ENTRE EL NUEVO TRAMO 3 Y EL NUEVO TRAMO 4:

C: 1,0 (adimensional)
V: 5 m/s
B: 9,25 m
R₀: 300 m

$$\Delta y = 0,07 \text{ metros}$$

SOBREELEVACIÓN DEL AGUA EN LA CURVA CREADA ENTRE EL NUEVO TRAMO 4 Y EL TRAZADO ANTIGUO DEL CANAL:

C: 1,0 (adimensional)
V: 5 m/s
B: 9,25 m
R₀: 300 m

$$\Delta y = 0,07 \text{ metros}$$

Todos estos valores de sobreelevación de la cota de lámina de agua en las curvas son completamente admisibles y por lo tanto éstas son aptas para solucionar el problema producido.

PERFIL TIPO 3

El nuevo perfil a realizar entre la sección 240 y la 140 se ha ajustado al nuevo trazado en planta descrito anteriormente y sus medidas se ajustarán al siguiente esquema de la *fig.15*. Se ha desplazado hacia la derecha 5 metros, donde existe terreno disponible para ampliar la curva. Se deja una pequeña zona de aguas bajas para permitir cierto calado para el mantenimiento de la vida acuática del arroyo, algunos anfibios y macroinvertebrados.

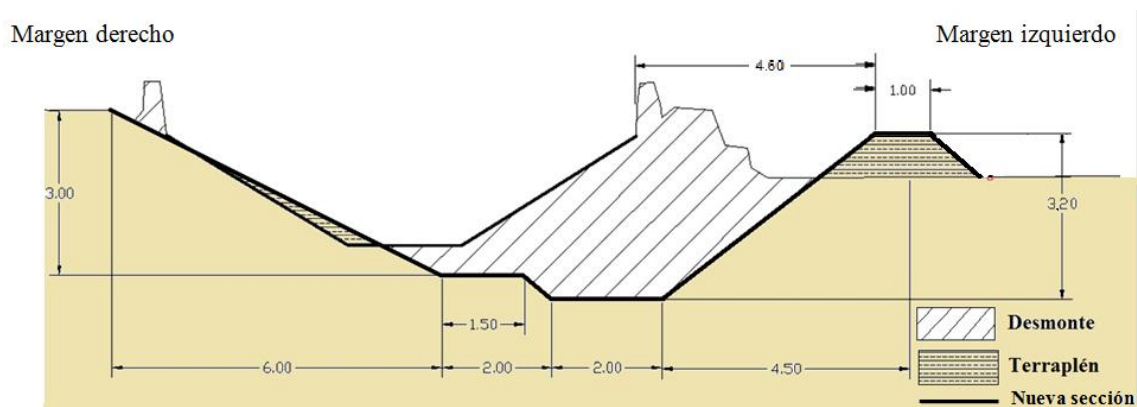


Fig. 15: Perfil tipo para el tramo comprendido entre las secciones 240 y 140. Elaboración propia

PERFIL TIPO 4

Finalmente, a partir de la sección 130 hasta la desembocadura, la nueva sección es la representada en la figura que viene a continuación. Se ha ampliado la sección 3 metros en el margen derecho y dos metros en el margen izquierdo ya que anteriormente los taludes eran verticales, se han tendido estos lo máximo posible y se ha diseñado, igual que en el perfil tipo anterior, una pequeña zona de aguas bajas.

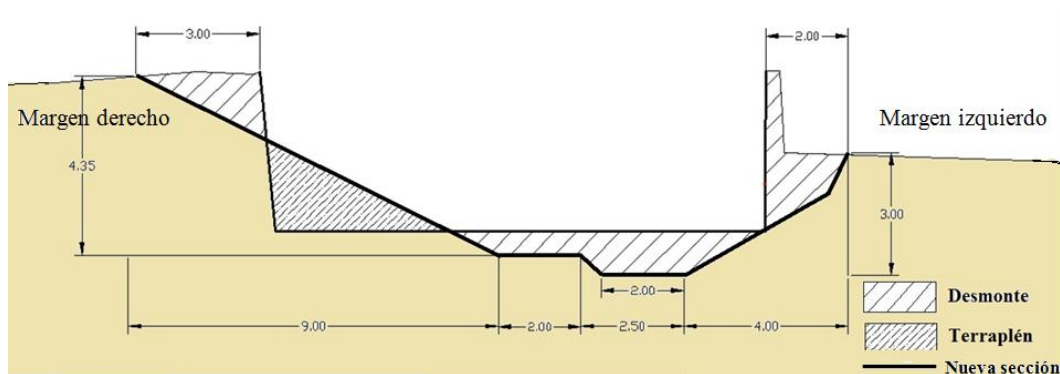


Fig. 16: Perfil tipo para el tramo comprendido entre las secciones 130 y 20. Elaboración propia

MODELIZACIÓN CON HEC-RAS DEL NUEVO TRAZADO

Con las secciones anteriores introducidas en HEC-RAS, su “n” de Manning correspondiente, y la variación del trazado en planta, se ha modelizado el caudal asociado al periodo de retorno de 500 años y determinado la cota de lámina de agua.

Además, se ha comprobado si, con estas nuevas condiciones, se podrán producir desbordamientos en el tramo.

Los resultados de los perfiles con la cota de lámina de agua para el caudal de 500 años obtenidos con la modelización de las secciones modificadas se pueden ver en un apartado al final de este anejo.

Observando los resultados se puede comprobar que el caudal máximo circulante, para un periodo de retorno de 500 años, con el nuevo diseño de secciones se comporta correctamente y no se producirán problemas de desbordamientos, sin embargo las velocidades son demasiado altas y se producirán problemas de erosión.

CAMBIO DE PERFIL LONGITUDINAL

Para obtener unos mejores resultados hay que variar el perfil longitudinal. El perfil del tramo antes de la actuación es muy uniforme, con una pendiente muy acusada al comienzo de este como se refleja en la siguiente imagen:

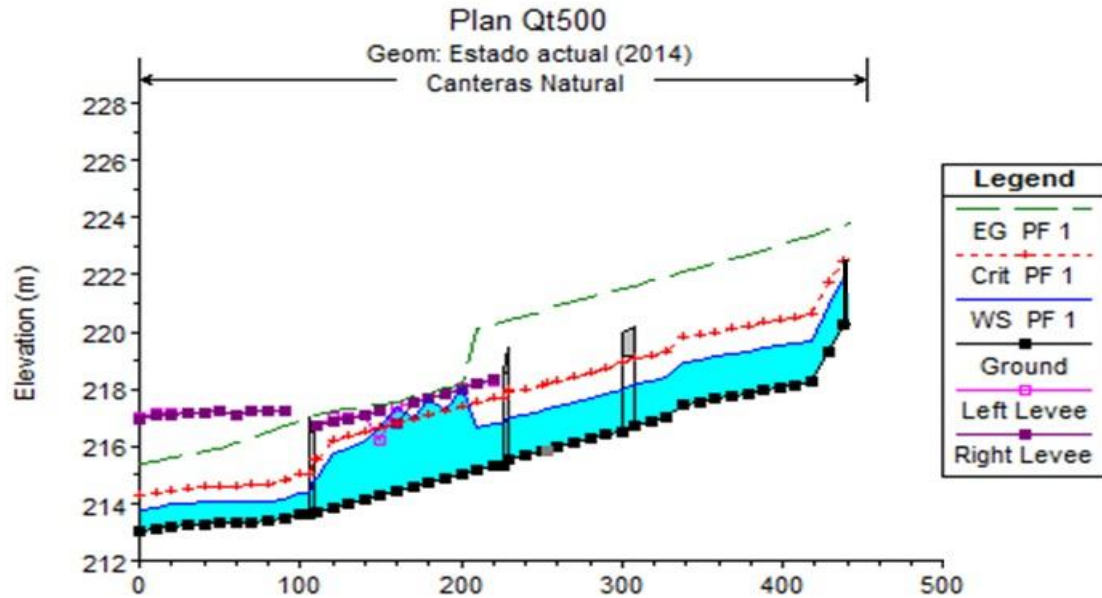


Fig. 17: Pendiente del tramo antes de la actuación. Obtenido de HEC-RAS.

Para modificar el perfil, una vez retirado el hormigón, se creará un salto de 80 cm después del segundo puente, en la zona problemática de la curva, para conseguir reducir la pendiente y disipar energía esa zona en concreto, (ver fig.18).

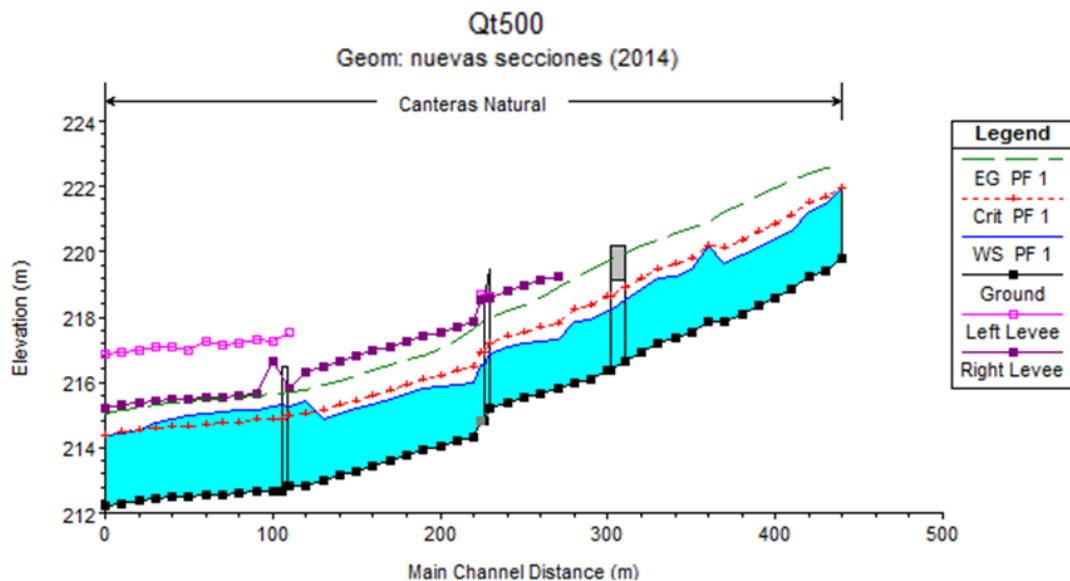


Fig. 18: Pendiente del tramo después de la actuación. Obtenido de HEC-RAS.

Para analizar mejor la modelización, se muestran en la siguiente tabla, de forma numérica, los resultados para el caudal asociado al periodo de retorno de 500 años en cada sección, tanto de caudal como de cota del lecho, cota de la lámina de agua, pendiente, velocidad del agua, área de flujo, número de Froude, etc.

Ver resultados HEC-RAS



Tabla 2: Resultados de la modelización del tramo después de la actuación para un caudal asociado a un periodo de retorno de 500 años. Obtenido de HEC-RAS

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Natural	460	PF 1	53.46	219.82	221.97	221.97	222.69	0.007853	3.77	14.2	10	1
Natural	450	PF 1	53.46	219.42	221.43	221.7	222.55	0.014704	4.68	11.42	9.13	1.33
Natural	440	PF 1	53.46	219.26	221.25	221.53	222.39	0.015292	4.75	11.26	9.08	1.35
Natural	430	PF 1	53.46	218.84	220.65	221.11	222.17	0.022265	5.46	9.79	8.53	1.62
Natural	420	PF 1	53.46	218.6	220.41	220.87	221.95	0.022669	5.5	9.73	8.49	1.63
Natural	410	PF 1	53.46	218.35	220.15	220.62	221.71	0.023445	5.54	9.65	8.46	1.65
Natural	400	PF 1	53.46	218.1	219.89	220.37	221.48	0.023436	5.58	9.59	8.44	1.66
Natural	390	PF 1	53.46	217.85	219.64	220.12	221.24	0.023885	5.61	9.54	8.36	1.67
Natural	380	PF 1	53.46	217.88	220.17	220.17	220.9	0.007855	3.79	14.15	10.19	1
Natural	370	PF 1	53.46	217.55	219.47	219.82	220.74	0.017483	4.99	10.73	8.93	1.44
Natural	360	PF 1	53.46	217.35	219.25	219.61	220.55	0.018412	5.06	10.57	8.96	1.48
Natural	350	PF 1	53.46	217.22	219.21	219.49	220.34	0.014658	4.71	11.36	9.19	1.33
Natural	340	PF 1	53.46	216.94	218.83	219.2	220.16	0.018387	5.1	10.49	8.88	1.48
Natural	330	PF 1	53.46	216.66	218.51	218.93	219.95	0.020395	5.33	10.05	8.56	1.55
Natural	320.1	Bridge										
Natural	320	PF 1	53.46	216.38	218.22	218.64	219.68	0.021274	5.35	10	8.59	1.58
Natural	310	PF 1	53.46	216.09	217.9	218.37	219.45	0.022692	5.5	9.72	8.43	1.63
Natural	300	PF 1	53.46	215.96	217.85	218.22	219.18	0.018648	5.12	10.45	8.9	1.49
Natural	290	PF 1	53.46	215.81	217.32	217.82	218.93	0.027869	5.62	9.52	9.76	1.82
Natural	280	PF 1	53.46	215.67	217.28	217.67	218.6	0.020968	5.1	10.49	10.07	1.59
Natural	270	PF 1	53.46	215.53	218.05	217.53	218.4	0.002477	2.65	21.6	14.17	0.61
Natural	260	PF 1	53.46	215.38	218.1	217.41	218.35	0.00204	2.21	24.28	14.94	0.54
Natural	250	PF 1	53.46	215.22	217.66	217.52	218.28	0.006149	3.47	15.4	10.1	0.88
Natural	248	Bridge										
Natural	244.*	PF 1	53.46	214.8	216.71	217.07	218.06	0.017384	5.14	10.4	7.76	1.42
Natural	240	PF 1	53.46	214.34	215.89	216.5	217.9	0.037917	6.27	8.53	9.19	2.08
Natural	230	PF 1	53.46	214.2	215.88	216.36	217.44	0.02713	5.55	9.63	9.67	1.77
Natural	220	PF 1	53.46	214.04	215.8	216.19	217.13	0.022011	5.12	10.44	10.12	1.61
Natural	210	PF 1	53.46	213.91	215.78	216.07	216.87	0.016527	4.63	11.55	10.51	1.41
Natural	200	PF 1	53.46	213.77	215.67	215.93	216.69	0.015088	4.48	11.94	10.7	1.35
Natural	190	PF 1	53.46	213.6	215.49	215.76	216.53	0.015665	4.53	11.79	10.66	1.37
Natural	180	PF 1	53.46	213.44	215.33	215.6	216.38	0.015784	4.54	11.78	10.65	1.38
Natural	170	PF 1	53.46	213.29	215.2	215.45	216.21	0.014919	4.46	12	10.73	1.34
Natural	160	PF 1	53.46	213.14	215.62	215.3	216.05	0.003729	2.93	18.86	13.28	0.72
Natural	150	PF 1	53.46	212.99	215.65	215.15	216	0.002643	2.63	21.31	14.08	0.61
Natural	140	PF 1	53.46	212.84	215.69	215.03	215.94	0.002165	2.23	24.05	14.93	0.55
Natural	130	PF 1	53.46	212.91	215.26	215.14	215.87	0.006486	3.47	15.41	10.12	0.89
Natural	124	Bridge										
Natural	120	PF 1	53.46	212.69	215.32	214.92	215.75	0.004065	2.92	18.33	10.86	0.72
Natural	110	PF 1	53.46	212.69	215.23	214.91	215.7	0.004555	3.05	17.55	10.75	0.76
Natural	100	PF 1	53.46	212.62	215.21	214.83	215.65	0.004033	2.92	18.29	11.01	0.72
Natural	90	PF 1	53.46	212.58	215.16	214.8	215.61	0.004223	2.97	18.01	10.9	0.73
Natural	80	PF 1	53.46	212.55	215.08	214.77	215.56	0.004755	3.09	17.33	10.65	0.77
Natural	70	PF 1	53.46	212.5	215.03	214.72	215.51	0.004618	3.06	17.47	10.75	0.76
Natural	60	PF 1	53.46	212.47	214.92	214.69	215.45	0.005469	3.24	16.48	10.47	0.82
Natural	50	PF 1	53.46	212.44	214.77	214.66	215.39	0.006645	3.48	15.37	10.19	0.9
Natural	40	PF 1	53.46	212.38	214.71	214.59	215.32	0.006316	3.46	15.46	10.29	0.89
Natural	30	PF 1	53.46	212.29	214.51	214.51	215.24	0.008171	3.76	14.21	9.85	1
Natural	20	PF 1	53.46	212.21	214.43	214.43	215.15	0.008327	3.78	14.14	9.8	1.01

Las velocidades que se van a alcanzar en el tramo una vez realizada la actuación quedan reflejadas en la siguiente gráfica:

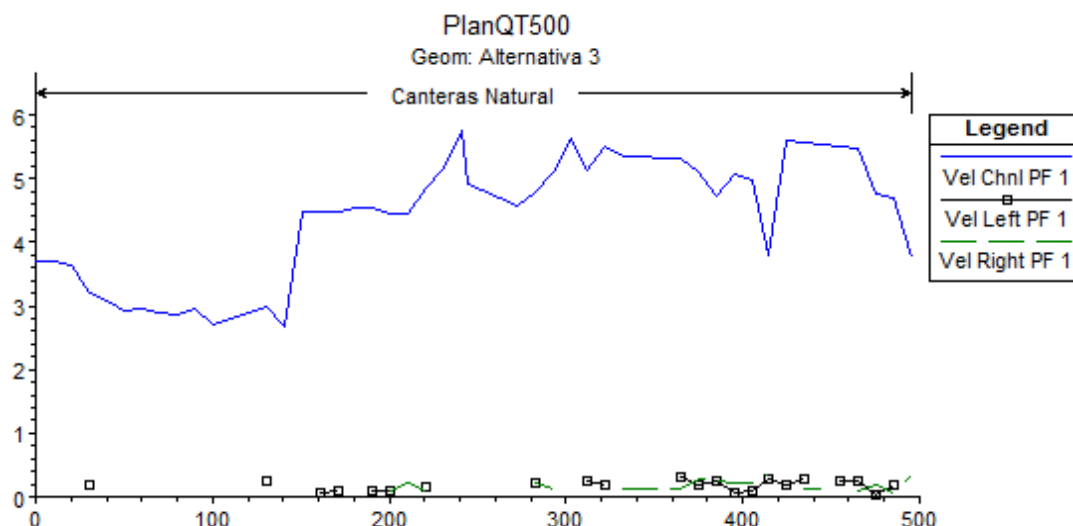


Fig. 19: Velocidades del tramo después de la actuación. Obtenido de HEC-RAS

Se observa que se producen unas velocidades muy altas (en torno a los 5 m/s) durante los 350 metros y después baja a 3 m/s. Según la Instrucción 5.2-IC de Drenaje Superficial de la MOPU, las velocidades máximas del agua que aguantan los distintos materiales que conforman un cauce son las siguientes:

Tabla 3: Velocidades máximas de agua admisibles para distintos materiales. Fuente: Instrucción 5.2-IC de Drenaje Superficial del M.O.P.U.

Naturaleza de la superficie	Máxima velocidad admisible (m/s)
Arena fija o limo (poca o ninguna arcilla)	0,20 - 0,60
Arena arcillosa dura, margas duras	0,60 - 0,90
Terreno parcialmente cubierto de vegetación	0,60 - 1,20
Arcilla, grava o pizarras blandas con cubierta vegetal	1,20 - 1,50
Hierba	1,20 - 1,80
Conglomerados, pizarras duras, rocas blandas	1,40 - 2,40
Mampostería, rocas duras	3,00 - 4,50
Hormigón	4,50 - 6,00

Ya que las velocidades son muy altas para un cauce sin revestimiento, hay que recurrir a otra alternativa.

3.1.4. ALTERNATIVA 4: MODIFICACIÓN DEL TRAZADO Y CREACIÓN DE SALTOS

Para intentar reducir la velocidad lo máximo posible, modelizando con el caudal asociado al periodo de retorno de 500 años, se recurrirá a una mayor reducción de la pendiente, ya que no hay espacio disponible para conseguirlo creando meandros, esta tendrá que reducirse mediante la creación de una serie de saltos.



Se han creado 5 saltos de 1 metro de altura aproximadamente dando como resultado el siguiente perfil:

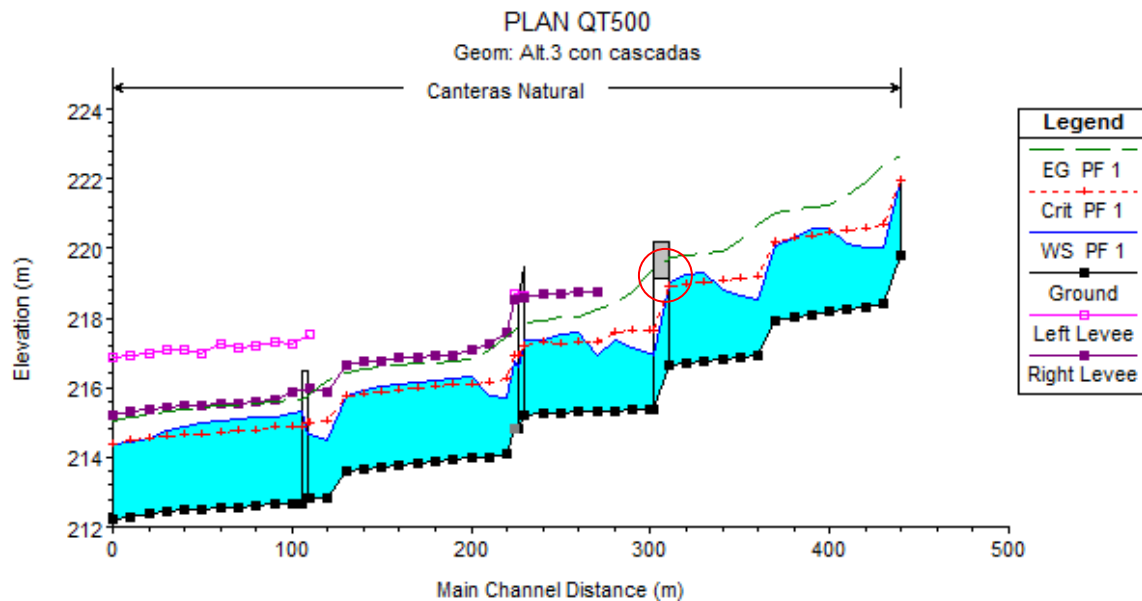


Fig. 20: Pendiente del tramo después de la actuación. Obtenido de HEC-RAS

El perfil longitudinal ha pasado de tener una pendiente de 0,011 m/m a estar formado por cinco tramos con pendiente de 0.004 m/m separados entre sí por saltos de un metro de altura aproximadamente. Se puede apreciar que el primer puente entra en carga ya que el nivel del agua alcanza el tablero.

Con este nuevo perfil de pendiente reducida y existencia de saltos, el gráfico de velocidades y el del número de Froude para el caudal de 500 años son los siguientes:

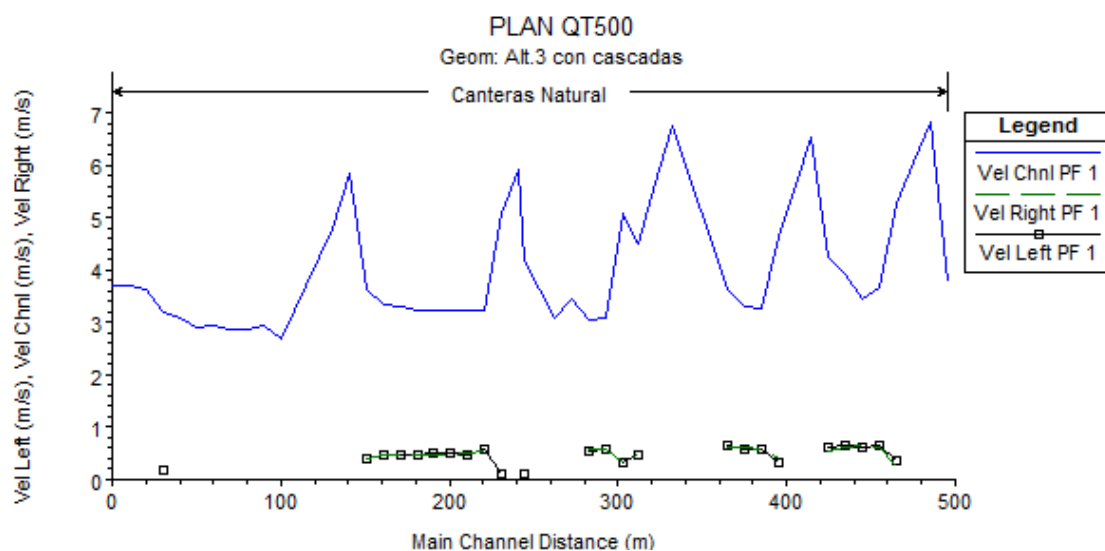


Fig. 21: Gráfico de velocidades del tramo después de la actuación. Obtenido de HEC-RAS.

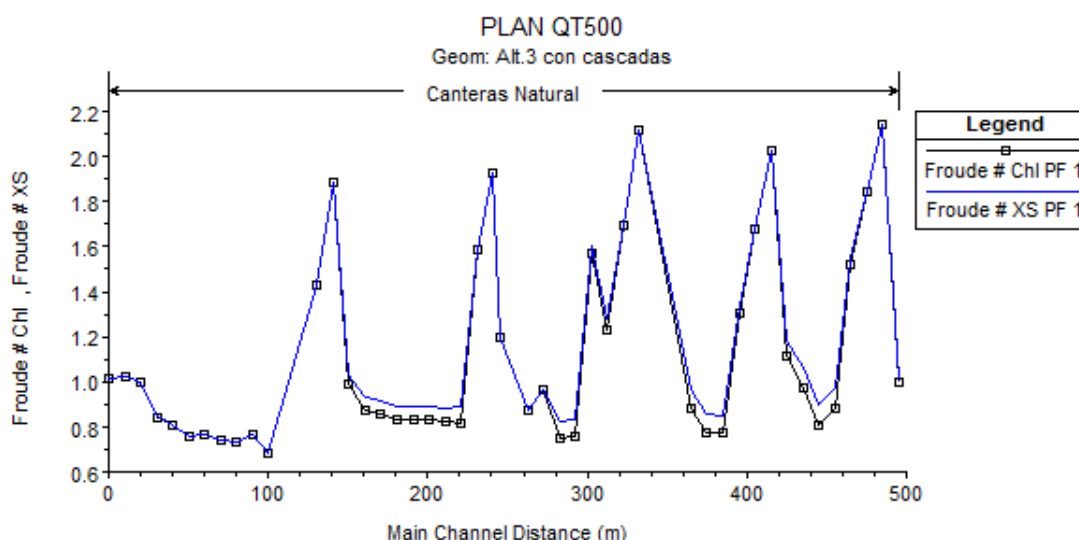


Fig. 22: Gráfico de “n” de Manning en el tramo después de la actuación. Obtenido de HEC-RAS.

Se puede apreciar que en estas zonas se produce un paso de régimen rápido a régimen lento de forma brusca con una importante disipación de energía. Para garantizar la estabilidad del lecho en estas zonas aguas abajo de los saltos, se ha decidido crear un cuenco de disipación, (ver *fig. 23.*), que reduzca adecuadamente la energía del agua.

Esta zona deberá estar protegida de la erosión con materiales resistentes a velocidades que rondan los 6 m/s. El material elegido es hormigón con piedras encima de la estructura de forma que el sistema se autoajuste, se produzca una mayor disipación de energía y aporte aspecto de naturalidad. (*Ver resultados de la modelización*)

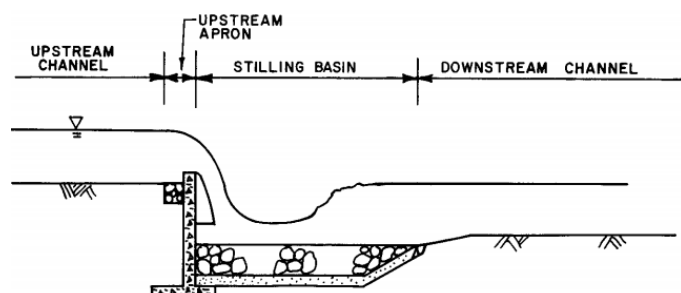


Fig. 23: Esquema de disipador de energía aguas abajo del salto. Obtenido de “Boulder County, Storm Drainage Criteria Manual. 1982”

Esta alternativa es mucho más viable que la anterior ya que se limitan los picos de altas velocidades a zonas concretas únicamente aguas abajo de cada salto, sin embargo, hay que reducir el caudal para evitar que el puente de la Nacional 432 entre en carga.

3.1.5. ALTERNATIVA 5: MODIFICACIÓN DEL TRAZADO Y CREACIÓN DE SALTOS (OPCIÓN 2)

Otra alternativa para evitar que el puente entre en carga consiste en cambiar la localización de los saltos, situándolos justo antes de los puentes para que la caída del



agua se produzca en la base del puente, la zona que tiene que crear turbulencias para disipar energía. De esa forma los disipadores de energía tendrán además la función de proteger la base de los puentes, sin embargo, es adecuado conseguir rebajar el caudal punta que llega al tramo de estudio.

3.2. PARA UN CAUDAL DE PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS

Ya que con el caudal de 500 años resultan unas velocidades demasiado altas se ha modelizado con el caudal del periodo de retorno de 100 años para contrastar ambos resultados.

3.2.1. ALTERNATIVA 6: ALTERNATIVA 4 CON CAUDAL T100

En esta alternativa se ha probado a modelizar la alternativa 4 con un periodo de retorno de 100 años en lugar de 500. Este caudal es $41,62 \text{ m}^3/\text{s}$, en comparación con los $53,46$ del periodo de retorno de 500 años. Siendo un periodo de retorno 5 veces mayor, el caudal es solo un 30 % mayor.

Los resultados de la modelización en el perfil creado anteriormente son los siguientes:

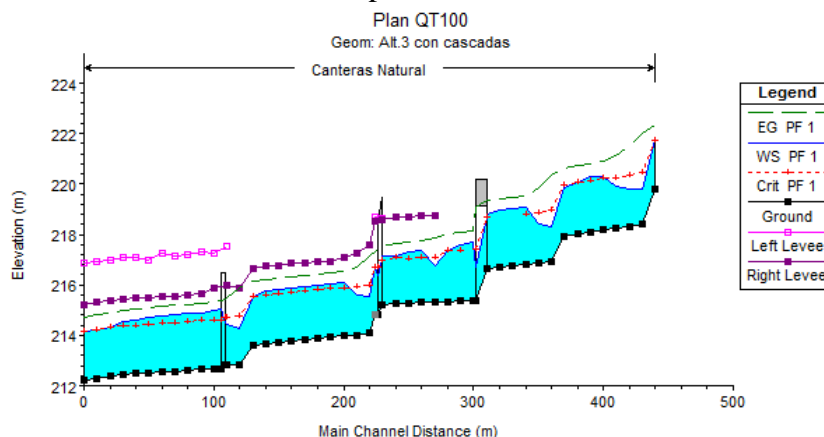


Fig. 24: Perfil del tramo de la alternativa 4 con QT100. Obtenido de HEC-RAS

Con respecto a la cota de lámina de agua, con un caudal máximo de periodo de retorno de 100 años, esta es unos 40 centímetros menor que con un caudal asociado a un periodo de retorno de 500 años. Además, se observa que el primer puente localizado en la sección 300 y la 320, el correspondiente a la carretera nacional N-432 no entra en carga como con el caudal del periodo de retorno de 500 años.

En las figuras 25 y 26 se pueden comparar las velocidades y el número de Froude de todo el tramo con la modelización de los caudales asociados al periodo de retorno de 100 y 500 años. Concretamente, con respecto a las velocidades del caudal de 100 años, estas se ven reducidas en $0,3 \text{ m/s}$ en comparación con el caudal máximo del periodo de retorno de 500 años y, en la zona del puente (señalado en rojo), sufren una gran reducción, de $6,8$ a $3,4 \text{ m}^3/\text{s}$, ya que con este caudal no entra en carga. Sin embargo, en la gráfica del número de Froude los valores no varían, exceptuando dicha zona del puente que pasan de un valor de 2,1 (régimen rápido) a 0,9 (régimen lento).

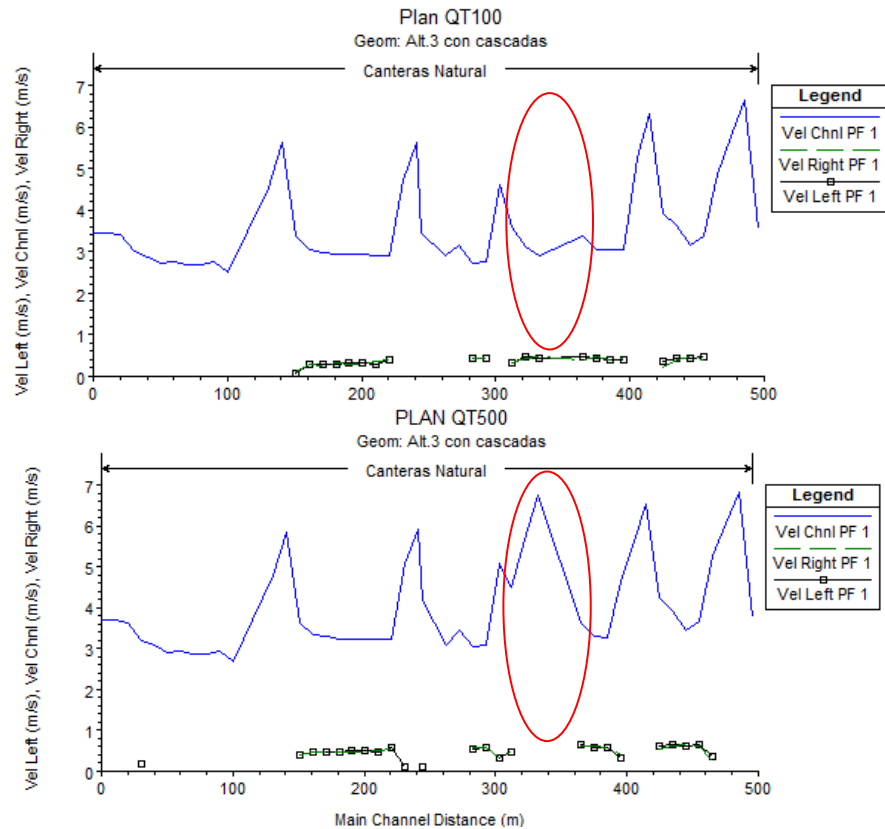


Fig. 25: Comparación de velocidades en el tramo de la alternativa 4 con QT100. Obtenido de HEC-RAS

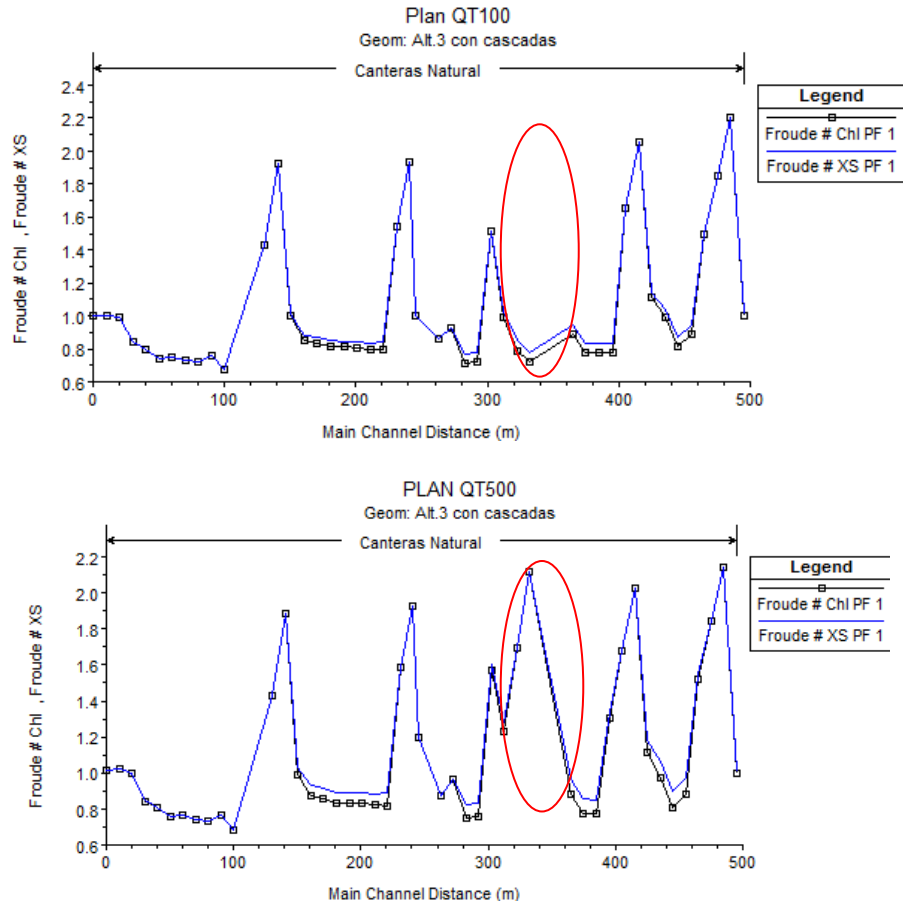


Fig. 26: Comparación de nº de Froude en el tramo de la alternativa 4 con QT100. Obtenido de HEC-RAS



CAUDAL MÁXIMO CON EL CUAL EL PRIMER PUENTE NO ENTRA EN CARGA

Viendo que con el caudal asociado al periodo de retorno de 500 años el puente entra en carga, se analiza con que caudal exacto el puente deja de tener ese problema ya éste no puede inundarse ni ser dañado ya que tiene un tráfico importante al ser una carretera nacional.

Mediante HEC-RAS, con la geometría del nuevo trazado se va probando introduciendo caudales menores a 53,45 m³/s, el caudal de 500 años, modelizando posteriormente hasta dar con el caudal buscado, el mayor caudal con el que el puente no entra en carga. Este caudal es 44 m³/s.

Para obtener el periodo de retorno asociado a dicho caudal hay que hacer el proceso inverso de cálculo de un caudal mediante un periodo de retorno. Con la tabla de Excel elaborada para el cálculo de los caudales, se va modificando la precipitación total diaria (Pd) hasta que el caudal resultante sea el buscado, 44 m³/s.

CAUDAL DE DISEÑO S/METODO RACIONAL MODIFICADO

Características físicas de la cuenca		Caudal por el Metodo Racional Modificado	
A: Area de la cuenca (Km ²) =	8.84	$Q = \frac{C * I * A}{3.6} * K'$	
L: Longitud del cauce (Km) =	5.63		
H: Desnivel (Km) =	0.279		
J: Pendiente (m/m) =	0.050		
$T_c = 1.974$ <p>Método valido si $T_c < 6$ horas</p>			
Datos según el periodo de retorno considerado T_c?			
Pd: Precipitación total diaria para T_c ?	115.23 mm	$K_a = \text{Coeficiente reductor por area aplicado a Pd:}$ $\begin{aligned} A < 1 \text{ Km}^2 &\Rightarrow K_a = 1 \\ 1 \leq A < 3.000 \text{ Km}^2 &\Rightarrow K_a = 1 - \frac{\log_{10} A}{15} \end{aligned}$	
Ka: Coeficiente reductor por area =	0.94		
Id: Intensidad media diaria para T_c ?	4.50 mm/h	$K' = \text{Coeficiente de correccion de Temez aplicado a Q:}$ $K' = 1 + \frac{T_c^{1.25}}{T_c^{1.25} + 14}$	
Gráfica I1/Id (s/mapa :Córdoba entre 9 y 8) =	8.5		
It: Intensidad media para T_c ?	26.123 mm/h	$K' = 1.1432$	
Po: Umbral de escorrentia (s/tabla) =	18.78 mm		
Coef. corrector (s/mapa: Córdoba entre 2,5 y 3) =	2.8	SIN recomendaciones AAA $Q = 11.36 \text{ m}^3/\text{seg}$	
C: Coeficiente de escorrentia =	0.155	CON recomendaciones AAA $Q = 44.00 \text{ m}^3/\text{seg}$	
Aplicando las recomendaciones de la D.P. de Córdoba de la AAA:			
No se admitirán valores de $Po^* > 25$ =>	Po^* adoptado = 25	=> Coeficiente de escorrentia = 0.386	
No se admitirán valores de $C < 0,6$ =>	C adoptado = 0.6		

Una vez averiguada la precipitación total diaria para el periodo de retorno buscado, 115,23 mm, en el software MAXPLUWIN se introducen los datos del centroide de la cuenca y se va variando el periodo de retorno hasta que la precipitación total diaria sea la obtenida anteriormente.

Ese periodo de retorno (T) es el que produce un caudal de 44 m³/s y resulta ser: T=135 años, un periodo de retorno insuficiente para garantizar la seguridad en una carretera nacional por lo que hay que instaurar otros métodos que consigan reducir el caudal punta circulante del periodo de retorno de 500 años.



4. ALTERNATIVAS CON MEDIDAS ESTRUCTURALES FUERA DEL TRAMO

Las medidas estructurales son las que consisten en la realización de obras de infraestructura que actúan sobre los mecanismos de generación, acción y propagación de las avenidas alterando sus características hidrológicas o hidráulicas.

Ya se han propuesto diversas medidas dentro del cauce en el tramo problemático pero actuando únicamente en el tramo no se consigue solucionar el problema totalmente. Es necesario conseguir reducir el caudal, evitar las altas velocidades y reducir la cota de lámina de agua para evitar que el puente de la nacional 432 entre en carga y que entre la cota inferior del tablero y el nivel del agua exista espacio suficiente para que objetos flotantes como troncos que arrastre la avenida, etc. no alcancen dicho tablero y se produzcan problemas de desbordamientos.

Las medidas expuestas en este apartado se combinarán con las anteriores para mejores resultados, estas son: la instalación de diques de laminación y la creación de una llanura de inundación artificial.

4.1. INSTALACIÓN DE DIQUES DE LAMINACIÓN

La laminación es un fenómeno natural que se produce en los ríos. Si no hay aportaciones o detracciones significativas de caudal en un tramo, las variaciones de caudal son menores en la sección aguas abajo que aguas arriba, es decir, se produce una atenuación en las desviaciones respecto al caudal medio. Esto se traduce en una disminución de los caudales máximos y un incremento de los mínimos al pasar a través del recorrido del río. Así, una avenida con una única punta se convierte en otra con un caudal máximo menor, que se retrasa en el tiempo y como el volumen total del agua circulante es constante, tiene una mayor duración.

Físicamente, cuando los caudales son crecientes, parte del agua que entra en un tramo sale por el otro extremo y parte se almacena en el ramal. El agua almacenada incrementará los caudales de salida cuando estos estén ya en disminución.

Un dique de laminación consiste en un muro en cuña en medio del cauce cuya finalidad es la de retener agua temporalmente realizando una laminación “forzada” y muy eficaz. El dique no se construye de manera impermeable, sino que contiene una serie de mechinales, (conductos que atraviesan la masa del dique, a distintas alturas, con una cierta pendiente hacia aguas abajo), que tienen por función la de colaborar al desagüe de la avenida o del caudal habitual más lentamente y drenar la cuña de sedimentos que se puedan retener con la existencia del dique.

Con la instalación de diques de laminación, se reduce y desfasa el pico de caudal máximo de una avenida ya que esta se almacena y se va liberando poco a poco. Esta reducción depende de la superficie de espejo del agua.



De esta forma, con la instalación de varios diques de laminación aguas arriba del tramo se reduciría el caudal de forma suficiente para que las velocidades no sean tan elevadas y baje la cota de lámina de agua evitando la entrada en carga del puente.

4.2. CREACIÓN DE UNA LLANURA DE INUNDACIÓN ARTIFICIAL

Según el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, se considera zona inundable todo terreno que pueda resultar inundado por los niveles teóricos que alcanzarían las aguas en las avenidas cuyo período de retorno sea 500 años, atendiendo a estudios geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos, así como de series de avenidas históricas y documentos o evidencias históricas de las mismas en los cursos de agua, así como las inundaciones en las zonas costeras y las producidas por la acción conjunta de ríos y mar en las zonas de transición. Estos terrenos cumplen labores de retención o alivio de los flujos de agua y carga sólida transportada durante dichas crecidas o de resguardo contra la erosión.

Siguiendo esta definición, uno de los mayores problemas existentes en el arroyo de las Canteras es su acusado encajonamiento y su falta de llanuras de inundación por lo que existe una nula conectividad lateral. Esto es debido a la gran erosión producida por los elevados caudales generados por el elevado volumen de escorrentía de su cuenca. (Se puede ver el volumen de escorrentía producido en la cuenca en el “*anejo 3: Estimación de erosión hídrica y emisión de sedimentos*”).

Desde hace tiempo la Directiva Marco del Agua, la ordenanza europea y las leyes que hacen referencia a la directiva de inundaciones dan gran importancia al valor de las llanuras de inundación ya que mejoran la continuidad lateral de río y el estado ecológico de las márgenes. Además, las llanuras de inundación sobre terrenos adecuados suponen un beneficio económico, ya que al dejar que el río se expanda en estas zonas, el agua pierde energía y el problema no se incrementa y desplaza aguas abajo. Si esto sucede se pueden producir grandes pérdidas económicas, incluso humanas, debido a desbordamientos, además se necesitarán costosas obras de mantenimiento en cauces al no encontrarse estos en equilibrio natural.

La función de las llanuras de inundación es el almacenamiento de agua cuando esta se desborda y la cesión al cauce tiempo después a un ritmo más bajo, por lo que desempeña un efecto importante de laminación. El agua se expande, se lamina, y a su vez se reduce su altura y velocidad.

Hay que elegir la zona de creación de la llanura en función de los riesgos potenciales que puedan darse: los que son y los que no son compatibles con los usos. Los usos compatibles suelen ser: choperas, algunos tipos de cultivo o zonas sin viviendas y alejadas de núcleos urbanos que pueden inundarse fácilmente sin causar grandes pérdidas. Las no compatibles son: áreas ocupadas por viviendas y áreas recreativas, en

las cuales se evitará la inundación. Técnicamente no es una obra muy compleja, pero requiere una perfecta planificación para el éxito de la actuación.



Fig. 27: Tramo aguas arriba de la zona de actuación del arroyo de las Canteras. Fotografía propia Noviembre 2013.

Para la localización de la o las zonas de creación de las llanuras de inundación, hay que realizar un estudio preliminar combinando mapas de pendientes, usos del suelo y profundidad del lecho del cauce para reducir costes.

Debido a la enorme incisión que sufre el arroyo (como se puede apreciar en la *figura 27*), para poder crear una llanura de inundación es necesario construir un dique de laminación que haga subir el nivel del agua, en la zona de creación de la zona inundable, en el caso de que el caudal sea demasiado alto. Habría que rebajar la cota del terreno a inundar por debajo de la coronación del dique para que el agua pueda salir del cauce y expandirse por dicha zona.

5. ALTERNATIVAS CON MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

Según el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, el enfoque tradicional consistente en plantear y ejecutar soluciones estructurales como la construcción de presas, encauzamientos y diques de protección, ha sido, en muchos de los casos, inadecuado e insuficiente.



Por ese motivo, durante las últimas décadas, estas medidas estructurales han tenido que ser complementadas con actuaciones no estructurales, aquellas que, sin actuar sobre la avenida en sí o sobre la acción del mar, modifican la susceptibilidad de la zona inundable frente a los daños por inundación.

Este tipo de medidas son los planes de protección civil, la implantación de sistemas de alerta, la corrección hidrológico-forestal de la cuenca y medidas de ordenación del territorio para atenuar las posibles consecuencias de las inundaciones. Estos tipos de actuaciones son menos costosas económicamente y a la vez menos agresivas medioambientalmente.

5.1. MODIFICACIÓN DE LOS USOS DEL SUELO

Como ya se ha visto en el “*anejo 3: Estimación de erosión hídrica y emisión de sedimentos*”, el caudal de un arroyo temporal como el arroyo de las Canteras, está determinado en su mayor parte por la escorrentía producida en la cuenca. Los factores que determinan la cantidad de escorrentía son: el tipo de suelo, la erosividad de la lluvia, la topografía del terreno, los usos del suelo y las prácticas de conservación del mismo.

Los factores que además de influir en la escorrentía, pueden ser modificables son: la topografía del terreno, la cual a nivel de cuenca no resulta factible económica ni ecológicamente; los usos del suelo, que en este caso, casi la totalidad de la cuenca está ocupada por cultivos de olivar; y por último, las prácticas de conservación, en este caso olivar a suelo desnudo.

Para reducir la escorrentía al máximo y por lo tanto el volumen de caudal generado, lo más eficaz es el cambio de usos del suelo, cambiando el olivar situado en pendientes pronunciadas por zona arbolada forestal además de cambiar las prácticas de conservación del suelo.

Para definir qué zonas deben ser reforestadas se ha recurrido a las investigaciones de la sección de Hidráulica Torrencial del Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (I.F.I.E.), la cual ha definido unos criterios de adecuación de los cultivos y pastizales en el territorio, reservando las áreas más vulnerables a la erosión hídrica a la vegetación permanente, especialmente la arbolada. Estos criterios se basaban en establecer las pendientes límite de cultivo y pastizal en relación con la erosión.

El primero en abordar estos temas fue J.M. García Nájera, que estableció y publicó su Ecuación de la pendiente máxima admisible en cultivos y pastizales. Basándose en este estudio y en las recomendaciones de la FAO, López Cadenas de Llano y Blanco Criado (1968) establecieron los índices de nivel de protección del suelo según la vegetación.

Tabla 4: Pendiente máxima admisible en las tierras de cultivo. Fuente: García Nájera, J.M. (1954).

Pendiente %	Uso del suelo
< 12 %	Suelos agrícolas con buenas prácticas de cultivo
12 - (18 o 24)* %	Suelos agrícolas con prácticas importantes de conservación de suelos como terrazas o bancales. Pastizales
(18 o 24)* - 30 %	Pastizales bien conservados
> 30 %	Matorral denso Bosque

**El valor límite de la pendiente varía según el tipo de suelo, siendo los más erosionables los asociados a 18% y los menos erosionables a 24%*

Siguiendo las recomendaciones de pendiente máxima admisible para los distintos usos del suelo, se cambiarán dichos usos siguiendo el mapa usos del suelo y de pendientes reclasificadas.

Leyenda

- Agrícola, ganadero
- Cultivos herbáceos de secano
- Matorral con pastizal
- Matorral denso con pastizal
- Olivar de regadío regado
- Olivar de secano
- Suelo desnudo
- Viñedo de secano

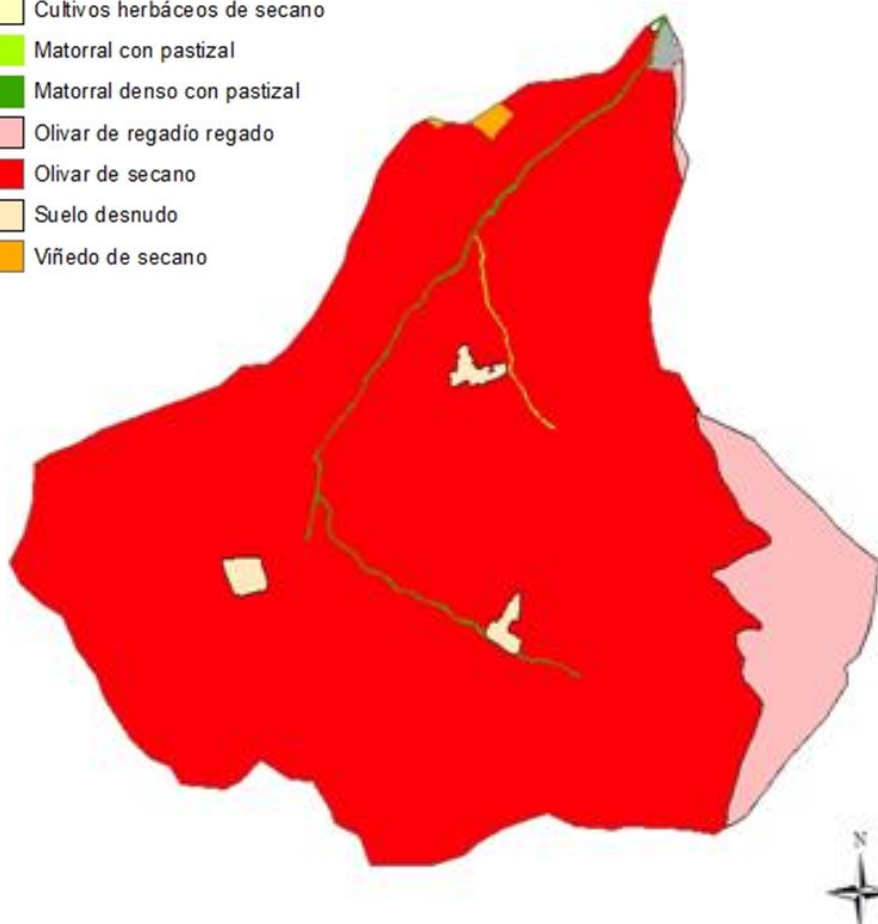


Fig. 28: Mapa de Usos del suelo de la cuenca del arroyo de las Canteras. Elaboración propia

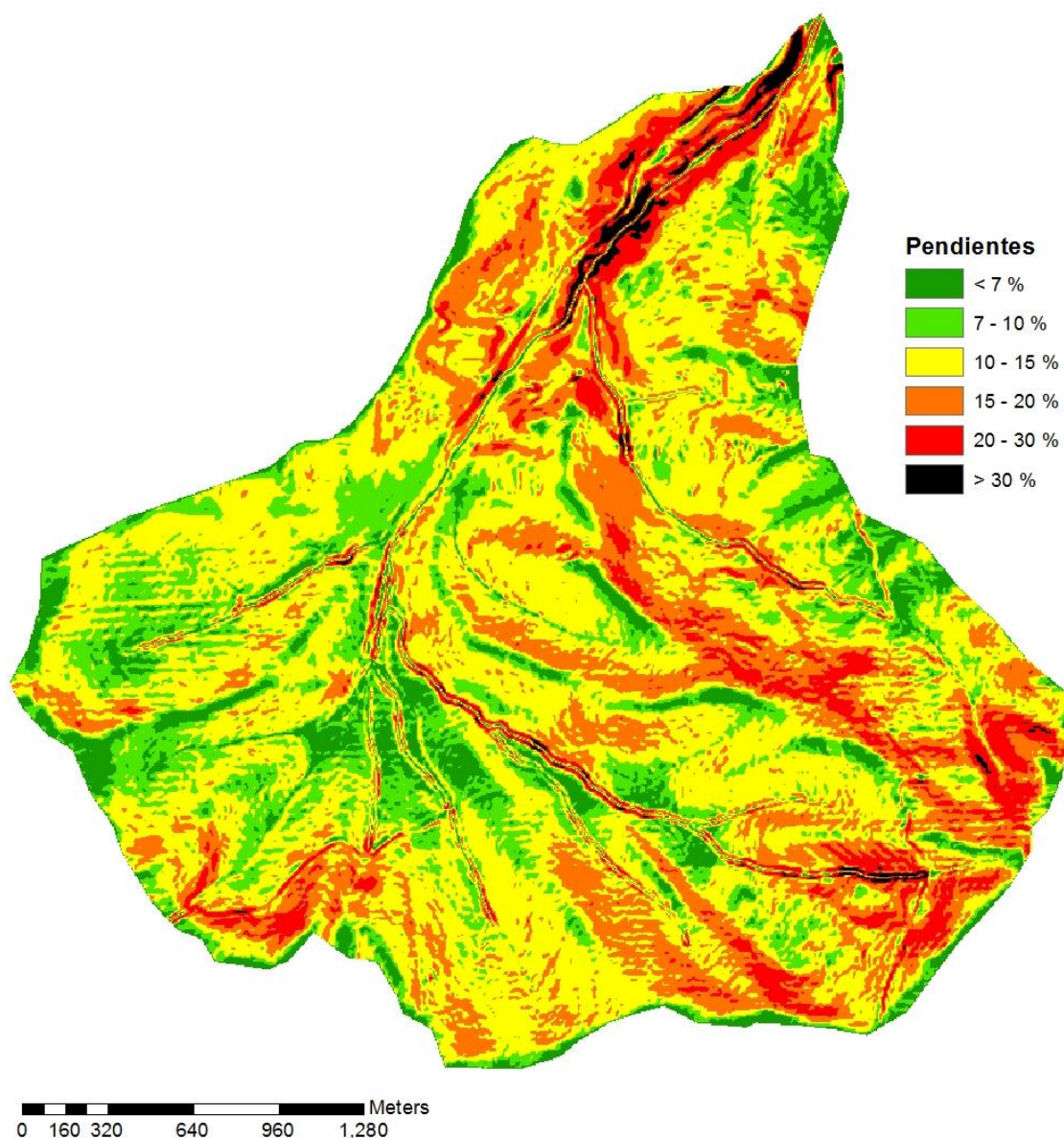


Fig. 29: Mapa de pendientes reclasificadas según riesgos de erosión. Elaboración propia

ZONAS CON PENDIENTE SUPERIOR AL 30%:

Ya que toda la cuenca está cubierta por olivar a suelo desnudo, se repoblarán estas zonas de acusada pendiente con arbolado y matorral autóctono con alta densidad. La repoblación deberá hacerse con encina (*Quercus ilex L.*), lentisco (*Pistacia lentiscus L.*), romero (*Rosmarinus officinalis L.*) y jara blanca (*Cistus albidus L.*) según la información de vegetación potencial obtenida en el “*anejo 1: Caracterización de la zona de estudio*”. Se eliminarán la mitad de los olivos existentes manteniendo la otra mitad hasta que la plantación se asiente.

Estas zonas son las que mayor riesgo de erosión tienen y, aunque ocupen una superficie reducida en la cuenca, deben ser correctamente protegidas.

La imagen objetivo de la restauración con las especies mencionadas es la siguiente:



Fig. 30: Imagen objetivo de bosque de encina en pendiente. Obtenido de <http://barresfotonatura.com>

ZONAS CON PENDIENTE COMPRENDIDA ENTRE 20 Y 30%:

En estas zonas se mantendrán pastizales con arbolado disperso, pudiendo mantenerse algún olivo y plantando un 10% de la superficie con encina. Estas zonas pueden utilizarse para ganadería extensiva.



Fig. 31: Imagen objetivo de pastizal con arbolado disperso. Obtenido de lirgbio-evolucion-iv.blogspot.com

ZONAS CON PENDIENTE INFERIOR AL 20%

En estas zonas que suponen la mayor parte de la cuenca se mantendrá el uso de cultivo de olivar con las siguientes prácticas de conservación:

Con pendientes entre **15 y 20%**, se crearán terrazas y se deberá dejar una cubierta vegetal permanente que puede ser segada en el momento de recogida de aceituna, además, se tendrán que adoptar medidas de protección en desagües. El objetivo es transformar una banda de una ladera inclinada en una terraza horizontal con el propósito de reducir la escorrentía superficial, incrementar la infiltración y, por consiguiente, también la producción agrícola.



Fig. 32: Olivar en terrazas con vegetación permanente. Obtenido de jardin-mundani.blogspot.com

Con pendientes del **10 al 15%**, se mantendrá una cubierta vegetal debiendo ser segada periódicamente antes de que entre en competencia con el olivar.



Fig. 33: Olivar con vegetación espontánea. Obtenido de www.viverossanfrancisco.es

Con pendientes del **7 al 10%**, el manejo será no laboreo, vigilando con frecuencia el estado de las malas hierbas y disponiendo las calles de plantación perpendiculares a línea de máxima pendiente



Fig. 34: Olivar con calles de vegetación perpendiculares a la pendiente. Obtenido de www.elbancondelolivar.com

Con pendientes **<7%**, se podrá labrar el terreno siempre y cuando sean labores superficiales (5cm) y no haya problemas de evaporación directa del suelo, evitándose la compactación del mismo por la circulación de maquinaria para mejor aireación de las raíces e infiltración del agua. En estas zonas puede dejarse el suelo desnudo ya que al no existir una pendiente importante no hay riesgo de erosión hídrica.



Fig. 35: Olivar a suelo desnudo. Obtenido de www.coralca.es



Con estas variaciones en los usos de la cuenca y las prácticas de conservación, se reducirá el volumen de escorrentía producida en la cuenca y los caudales sólidos ya que estos son retenidos por la cubierta vegetal. Todo esto hace que el caudal punta de cualquier aguacero sea menor.

Un problema determinante para efectuar esta alternativa es la propiedad privada de todos los terrenos existentes en la cuenca. Es necesario realizar una serie de jornadas divulgativas para los propietarios en las cuales se expliquen los beneficios sociales, evitando inundaciones y mejorando la calidad del suelo y por lo tanto de la producción del cultivo; ecológicos, gracias al aumento de biodiversidad y la reducción de pérdida de suelo.

Para dar valores a la reducción de la erosión y la escorrentía producida en la cuenca después de estas actuaciones se recurre a la MUSLE. Según el estudio previo realizado en el “*anejo 3: Estimación de erosión hídrica y emisión de sedimentos*”, la situación actual es la siguiente:

El volumen de escorrentía producido con la cuenca en el estado actual es el siguiente:

Ecuación 3

$$V = P.Ce.S$$

* *P*: Volumen de agua producido por el aguacero

* *Ce*: Coeficiente de escorrentía

* *S*: Superficie de la cuenca

$$\left. \begin{array}{l} P_t = 140 \text{ mm.} \\ C_e = 0,454 \\ S = 8,84 \text{ km}^2 = 8.840.000 \text{ m}^2. \end{array} \right\} V = 561.870 \text{ m}^3$$

ESTIMACIÓN DEL NUEVO VOLUMEN DE ESCORRENTÍA (V)

Con los nuevos cambios en la cuenca, el coeficiente de escorrentía bajaría aproximadamente hasta 0,1, produciéndose la siguiente variación de volumen:

$$\left. \begin{array}{l} P_t = 140 \text{ mm.} \\ C_e = 0,1 \\ S = 8,84 \text{ km}^2 = 8.840.000 \text{ m}^2. \end{array} \right\} V = 123.760 \text{ m}^3$$

Se produce una reducción del volumen de escorrentía casi del 80%

Teniendo en cuenta que el caudal del arroyo de las Canteras proviene casi en su totalidad de la escorrentía de la cuenca, se produciría una reducción muy importante en el caudal y no habría problemas de inundaciones, pudiendo hacerse una excelente restauración ecológica del arroyo.



ESTIMACIÓN DE LA NUEVA CANTIDAD DE SEDIMENTOS EMITIDA POR AGUACERO (Y)

Una vez calculada la reducción del volumen de escorrentía, se ha comparado la reducción de la cantidad de sedimentos emitida por aguacero, después de los cambios en la cuenca, con los que se emitirían con el estado actual.

La cantidad actual según se ha calculado en el *anejo 3* es la siguiente:

Ecuación 4
$$Y = 11,8. (V. Q_p)^{0,56} . K. C. P. LS \text{ (t/aguacero)}$$

- $V = 561.870 \text{ m}^3$
- $Q_p = 53,46 \text{ m}^3/\text{s}$
- $K = 0.45$
- $C = 0.516$
- $P = 1$
- $LS = 1,22$

$$Y = 11,8. (V. Q_p)^{0,56} * 0,283284 = 51.475 \text{ toneladas / aguacero}$$

Existe un margen sustancial de mejora realizando los cambios anteriormente descritos en los factores “P” y “C”:

El valor del factor “C” medio para la cuenca puede llegar a bajar a un 0.1 y el valor del factor “P” a un 0,5. (Estos valores son estimaciones conservadoras pudiendo llegar a ser menores).

Aun manteniendo el mismo caudal punta, y sabiendo que este se va a reducir considerablemente con la disminución de la escorrentía, con los cambios de los factores P y C y con el nuevo volumen de escorrentía se observa un cambio sustancial en la emisión de sedimentos de la cuenca:

$$Y = 11,8. (V. Q_p)^{0,56} * 0,02745 = 2.138 \text{ toneladas / aguacero}$$

Con unos adecuados usos del suelo y prácticas de conservación seleccionados según la pendiente del terreno, las toneladas emitidas por aguacero disminuyen en casi 50.000 toneladas, es decir, se reducen en más de un 95% en comparación con el valor que se da actualmente.

Se puede corroborar, que esta alternativa es la más eficaz, ya que soluciona la fuente del problema, el exceso de escorrentía en la cuenca, eliminando así problemas derivados secundarios como por ejemplo los desbordamientos producidos en el último tramo del arroyo afectando al núcleo urbano.



6. RESUMEN DE ALTERNATIVAS

Para resumir las alternativas descritas se ha realizado una breve descripción, además de las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas.

MEDIDAS ESTRUCTURALES DENTRO DEL TRAMO

PARA UN CAUDAL DE PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS:

ALTERNATIVA 1: AUMENTO DE LA ALTURA DEL MURO

La primera alternativa consiste únicamente en el aumento de la altura y grosor del muro que bordea el canal dejando el resto de la estructura intacta.

Ventajas:

- Bajo coste
- Simplicidad de la obra
- Rapidez de ejecución
- Evita desbordamientos en la zona conflictiva
- No requiere expropiaciones de terreno

Inconvenientes:

- Traslada el problema aguas abajo
- No mejora la calidad ambiental
- Agrava el impacto visual de la zona

ALTERNATIVA 2: RESTAURACIÓN DEL ANTIGUO CAUCE

Esta alternativa plantea la opción rehabilitar el antiguo cauce del arroyo además de dismantelar y restaurar la zona del canal actual.

Ventajas:

- Recupera la naturalidad del arroyo
- Asegura la viabilidad del trazado ya que este no está forzado

Inconvenientes:

- Requiere expropiación de terreno privado
- El antiguo cauce se encuentra actualmente urbanizado

ALTERNATIVA 3: RETIRADA DEL HORMIGÓN Y REDIMENSIONAMIENTO DEL CAUCE ACTUAL

Esta alternativa se basa en la retirada del hormigón y en la modificación, dentro de lo posible, del cauce actual, tanto las secciones como el trazado en planta y en perfil.

Ventajas:



- Mejora el estado ecológico arroyo.
- Evita desbordamientos.

Inconvenientes:

- Genera elevadas velocidades y calados.
- Conlleva un elevado coste y complejidad de diseño de la actuación.
- Necesita estructuras de protección contra la erosión.
- Requiere la expropiación de una parte de terrenos privados.

ALTERNATIVA 4: MODIFICACIÓN DEL TRAZADO Y CREACIÓN DE SALTOS

Esta alternativa consiste en la alternativa anterior añadiendo una serie de saltos en el tramo justo aguas abajo de los puentes para reducir la pendiente y disipar energía.

Ventajas:

- Se reduce la velocidad y el poder erosivo del agua.
- Se mejora el estado ecológico arroyo.
- Se evitan desbordamientos.

Inconvenientes:

- Conlleva un mayor coste de ejecución y complejidad del diseño de la actuación.
- Aumenta el calado del agua.
- Produce problemas ya que el primer puente entra en carga.
- Necesita estructuras de protección contra la erosión.
- Requiere la expropiación de una parte de terrenos privados.

ALTERNATIVA 5: MODIFICACIÓN DEL TRAZADO Y CREACIÓN DE SALTOS (OPCIÓN 2)

La alternativa es igual que la anterior pero cambiando la localización de los saltos a inmediatamente aguas arriba de los puentes.

Ventajas:

- Aprovecha la construcción de los cuencos de disipación en la base de los puentes para protegerlos de la erosión
- El puente no entra en carga
- Reduce la velocidad y el poder erosivo del agua
- Mejora el estado ecológico arroyo
- Evita desbordamientos

Inconvenientes:

- Conlleva un mayor coste de ejecución y complejidad del diseño de la actuación.
- Aumenta el calado del agua.
- Necesita estructuras de protección contra la erosión.
- Requiere la expropiación de una parte de terrenos privados.



PARA UN CAUDAL DE PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS:

ALTERNATIVA 6: ALTERNATIVA 4 CON CAUDAL T100

Esta alternativa se ha estudiado únicamente para comparar el comportamiento de la alternativa 4 con un caudal asociado a un periodo de retorno de 500 años y con uno de 100 años.

Ya que la zona es urbana no se considera posible una alternativa que funcione únicamente para un periodo de retorno de 100 años.

MEDIDAS ESTRUCTURALES FUERA DEL TRAMO

INSTALACIÓN DE DIQUES DE LAMINACIÓN

Esta medida consiste en la construcción de una serie de diques de laminación aguas arriba del tramo.

Ventajas:

- Reducen el caudal punta de las avenidas.
- Reducen la velocidad y calado del agua que llega al tramo de estudio.
- Permiten la circulación del agua.
- Evitan desbordamientos.
- Pueden reducir la pendiente aguas arriba de su localización.
- No requiere expropiación de terreno.

Inconvenientes:

- Conllevan un elevado coste de ejecución y complejidad de diseño.
- Suponen un obstáculo impidiendo la conexión longitudinal del arroyo.
- Suponen una trampa de sedimentos.

CREACIÓN DE UNA LLANURA DE INUNDACIÓN ARTIFICIAL

Con esta medida se pretende habilitar una zona como llanura de inundación artificial, se requerirá de la instalación de un dique por cada salida de agua del cauce ya que este posee una elevada incisión y la cota de lámina de agua no supera la sección creada por la erosión.

Ventajas:

- Laminación de avenidas
- Mejora del estado ecológico de la zona
- Mejora de la conexión lateral del arroyo
- Reducción de poder erosivo aguas abajo



Inconvenientes:

- Complejidad de diseño y buen funcionamiento
- Impedimento de la conexión longitudinal del arroyo

MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

CAMBIOS EN LOS USOS DEL SUELO Y PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN

Las medidas no estructurales propuestas son el cambio de usos del suelo en la cuenca y las prácticas de conservación del olivar.

Ventajas:

- Reducción importante de la escorrentía
- Incremento de la infiltración y la calidad de las aguas
- Reducción de la pérdida de suelo
- Reducción de la erosión hídrica
- Mejora de la calidad de los cultivos
- Mejora del estado ecológico de la cuenca

Inconvenientes

- Lentitud de instauración de las medidas
- Negativa de los propietarios
- Zona de actuación muy extensa

7. CONCLUSIONES

En primer lugar, este anejo llega a la conclusión de que no solo hay una única alternativa que pueda solucionar el problema, sino que la elección de una alternativa u otra depende del valor ecológico que aporte a la zona, la mejora social o el coste de la actuación.

Por otro lado, una sola actuación es difícil que solucione el problema que se pretende solucionar, por lo que hay que seleccionar una serie de alternativas que trabajen en conjunto ya que sus efectos pueden ser sinérgicos.

CASO 1

Este caso está conformado por el conjunto de alternativas que darán mejor resultado, sine embargo requieren de la aprobación y participación de los propietarios de las parcelas que conforman la cuenca hidrográfica del arroyo.

Las alternativas son las siguientes:



- 1º Cambios en los usos y prácticas de conservación del olivar en la cuenca.
- 2º Creación de una llanura de inundación artificial.
- 3º Retirada del hormigón y redimensionamiento del cauce.

Cabe señalar que, en este caso, al ser un arroyo cuya agua proviene casi íntegramente de las lluvias, se reduce el caudal punta producido por un aguacero al disminuir enormemente la escorrentía. De ese modo, los calados y velocidades alcanzadas en el tramo serán mucho menores y no se requerirán elementos de protección de la erosión para el cauce como zonas hormigonadas, muros ni escolleras. Por otro lado, por el mismo motivo de reducción de velocidad y calado, la actuación será más estable, no requerirá de un mantenimiento constante y se podrá asentar sobre los taludes una vegetación de ribera adecuada que mejore el estado ecológico y el entorno del tramo.

CASO 2

En el caso de que no sea posible el cambio de usos y prácticas de conservación del olivar debido a la negativa de los titulares de las parcelas, la solución al problema será más difícil, sin embargo se recurrirá a las siguientes alternativas, todas con actuaciones estructurales, con las que se pierde el potencial ecológico de la actuación:

- 1º Creación de una serie de diques de laminación.
- 2º Creación de una llanura de inundación artificial.
- 3º Retirada del hormigón y redimensionamiento del canal.
- 4º Creación de saltos a lo largo del tramo para reducir la pendiente.

Con este caso no se soluciona el origen del problema, sin embargo se lamina el caudal que llega a la zona de estudio para evitar los daños que se producen actualmente.

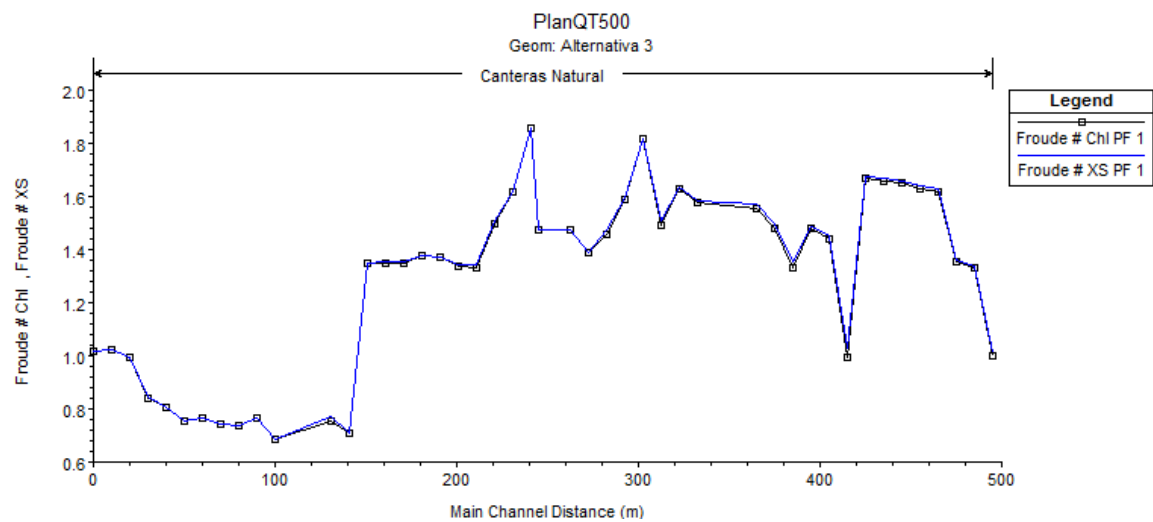
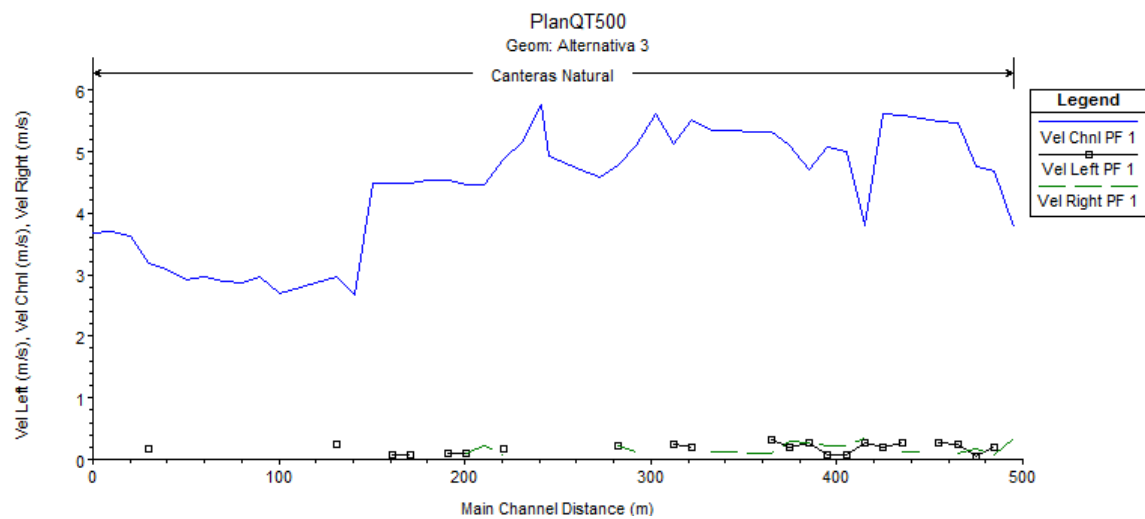
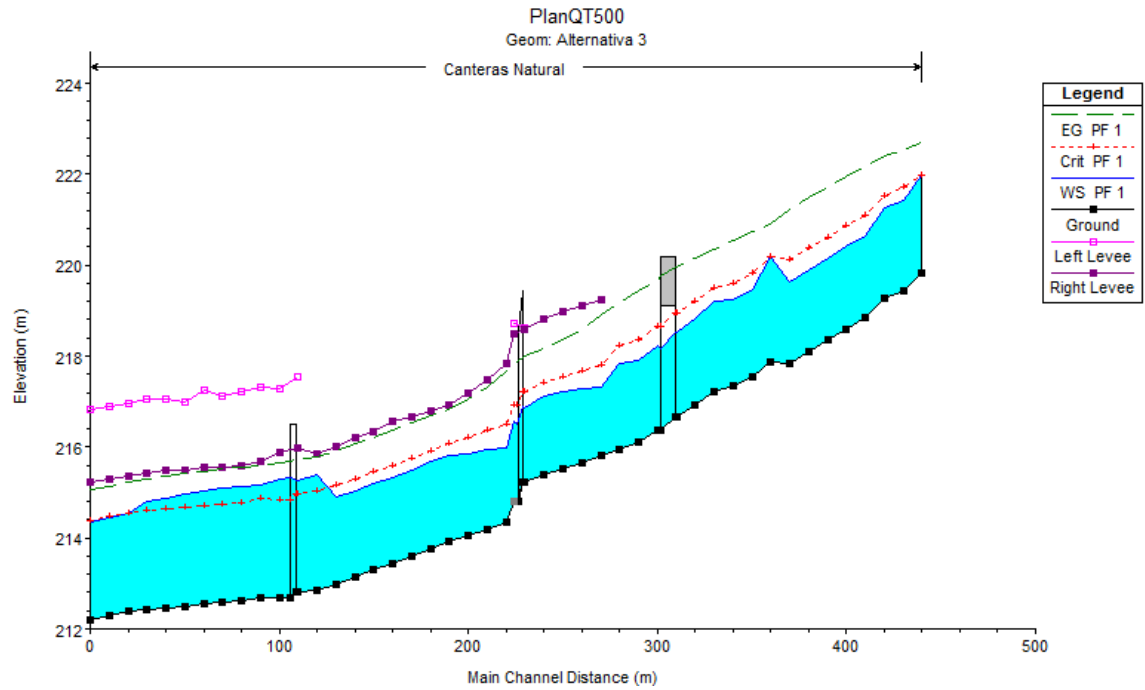
Eliminando el hormigón y redimensionando el cauce se produce una pequeña mejora ecológica, pequeña ya que las velocidades siguen siendo bastante altas y producen una gran erosión en determinadas zonas que serán protegidas como, por ejemplo, con cuencas de disipación de hormigón debajo de los saltos y con escollera en la parte exterior de las curvas. El resto de las zonas se protegerán con elementos de bioingeniería en función de los cortantes que se alcancen en lecho y taludes por lo que serán revegetadas.

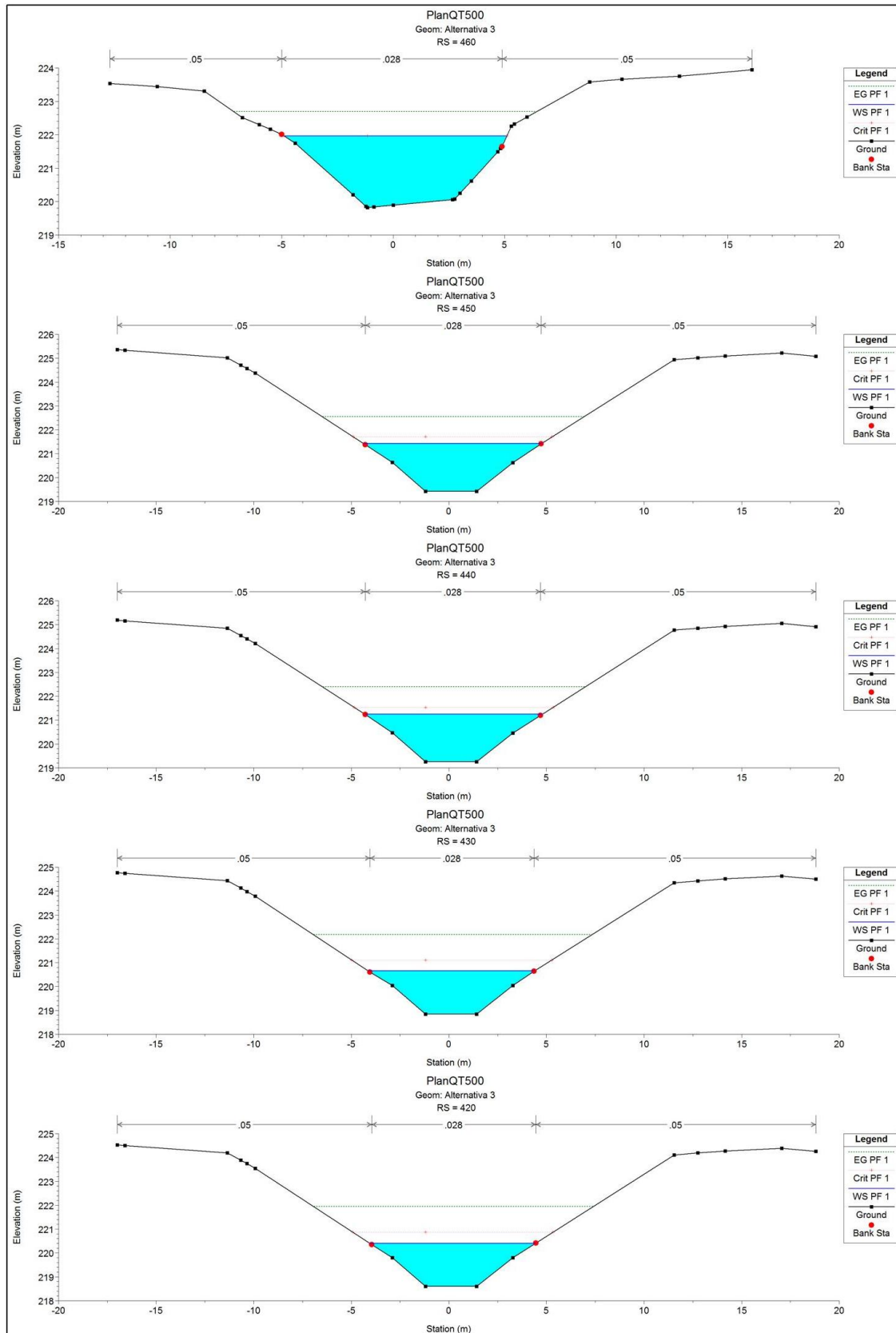
Una vez seleccionado uno de los dos casos se deberá desarrollar un proyecto que indique exactamente como debe de realizarse.

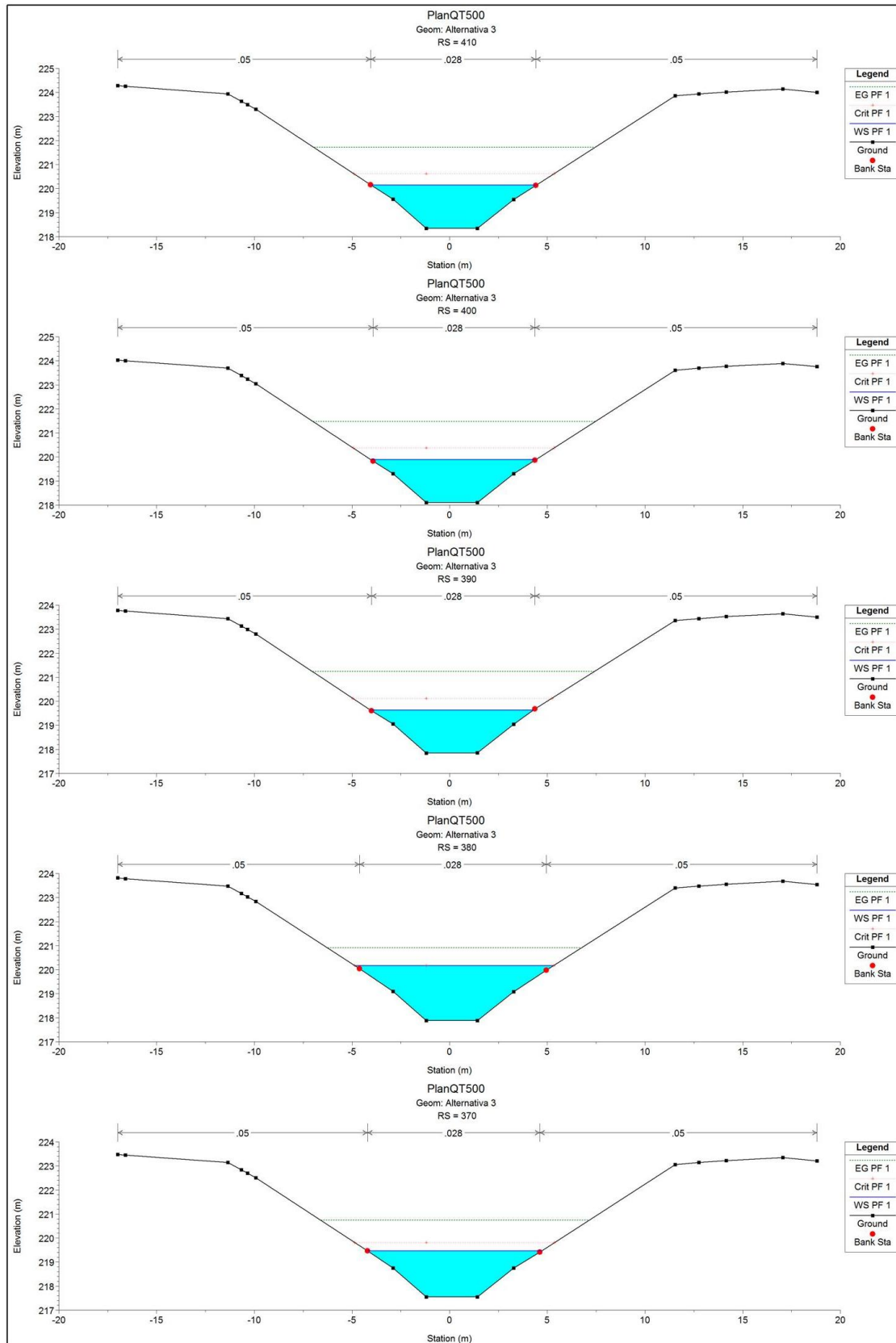


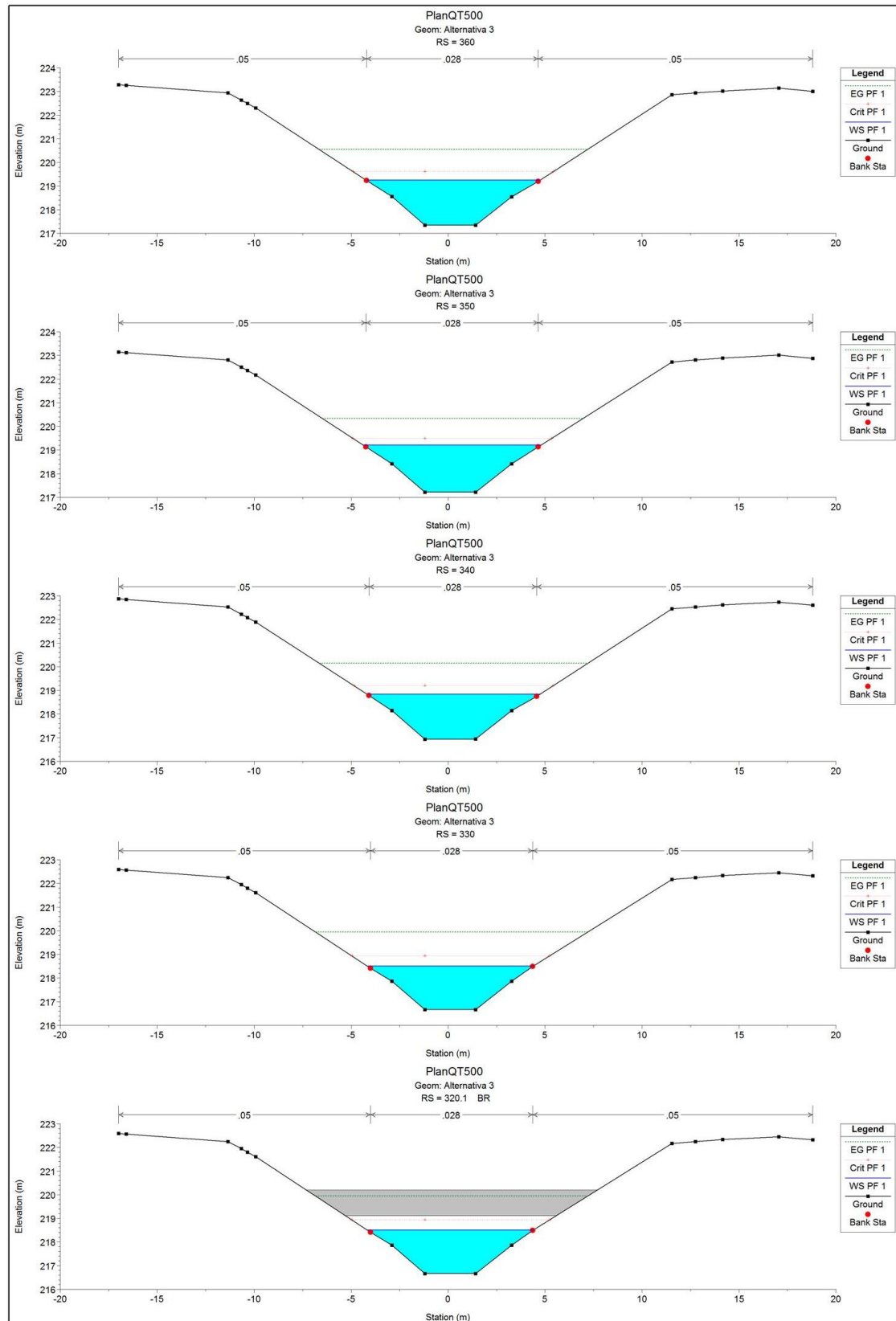
ALTERNATIVA 3:

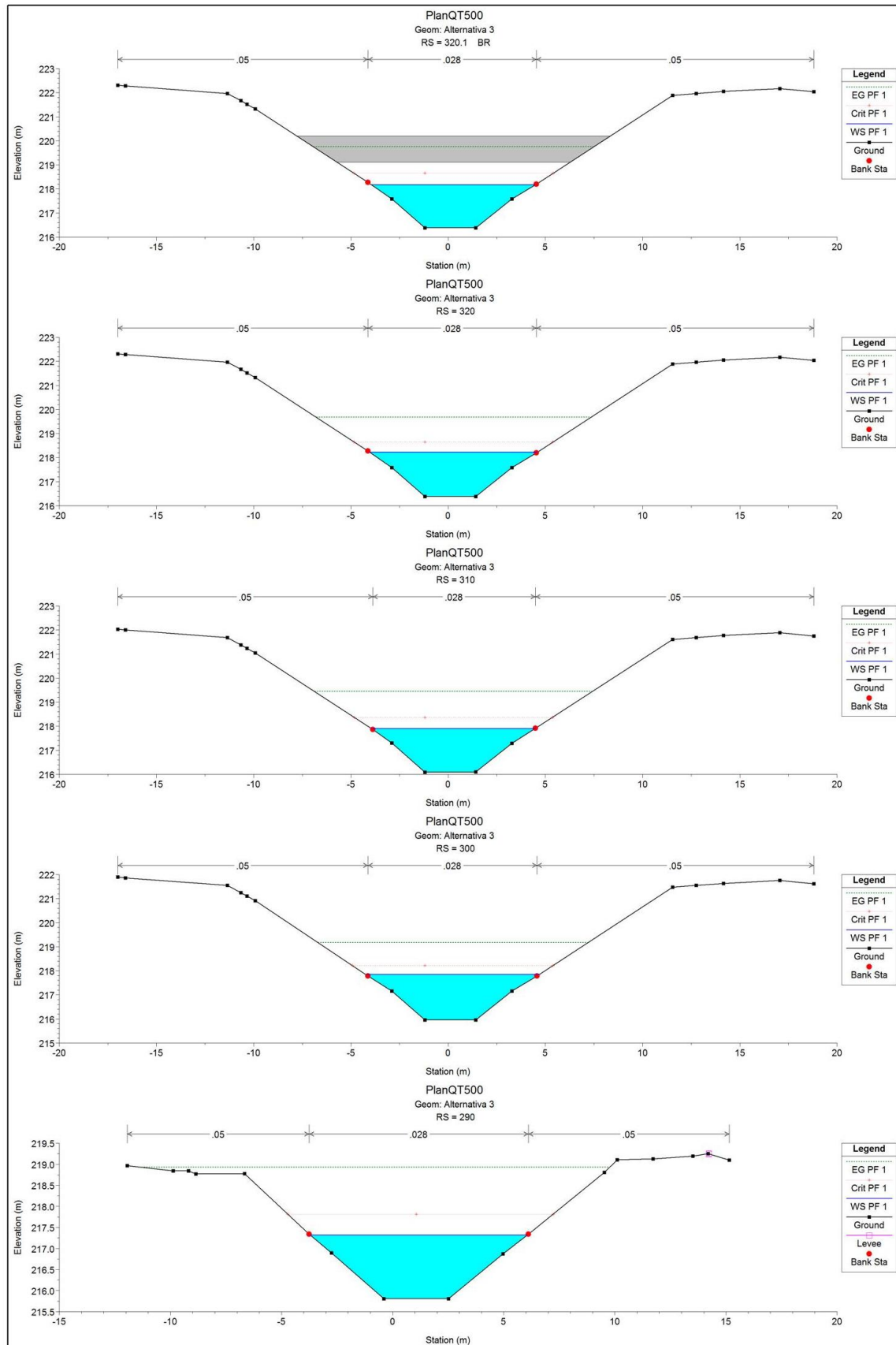
RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN CON CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS

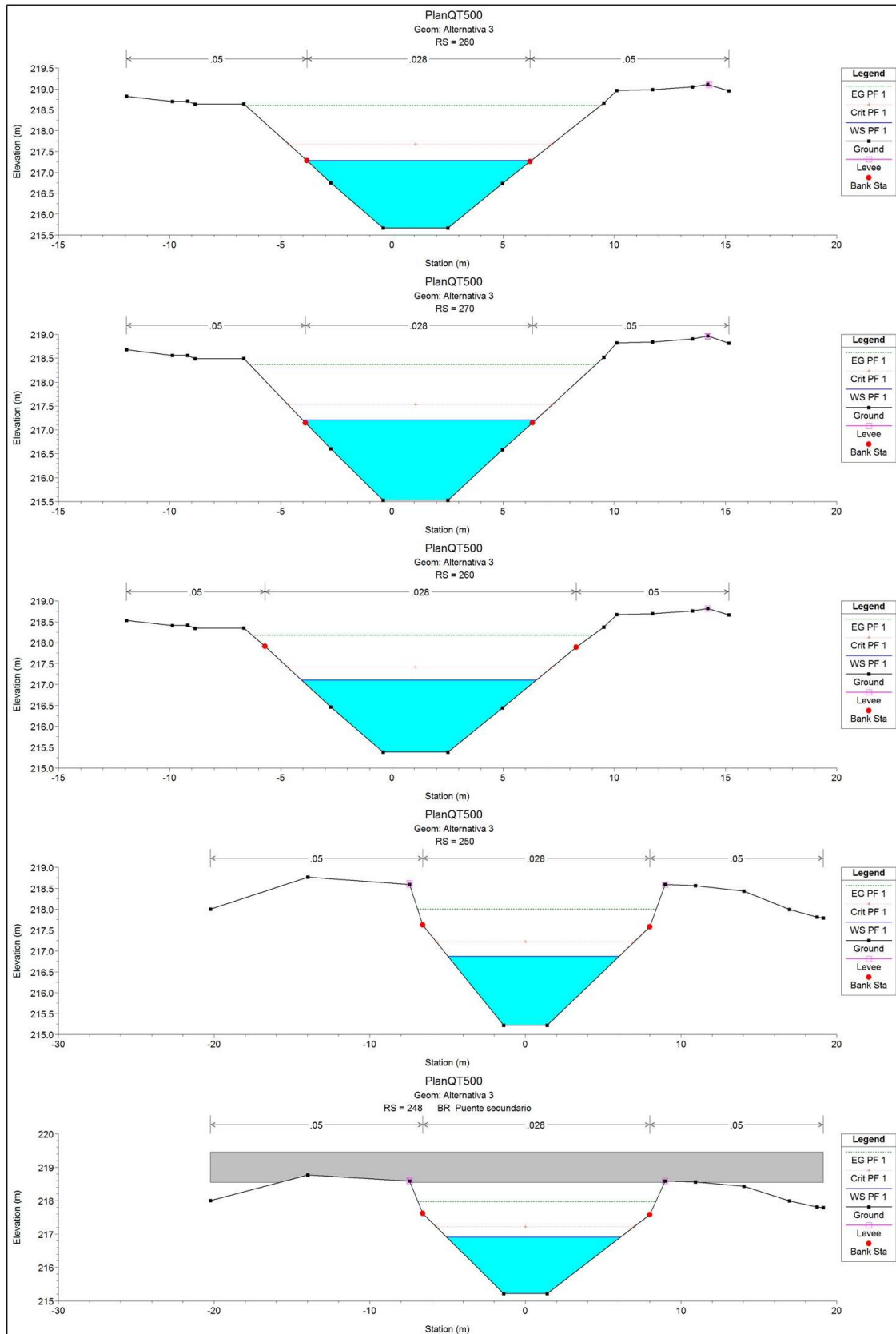


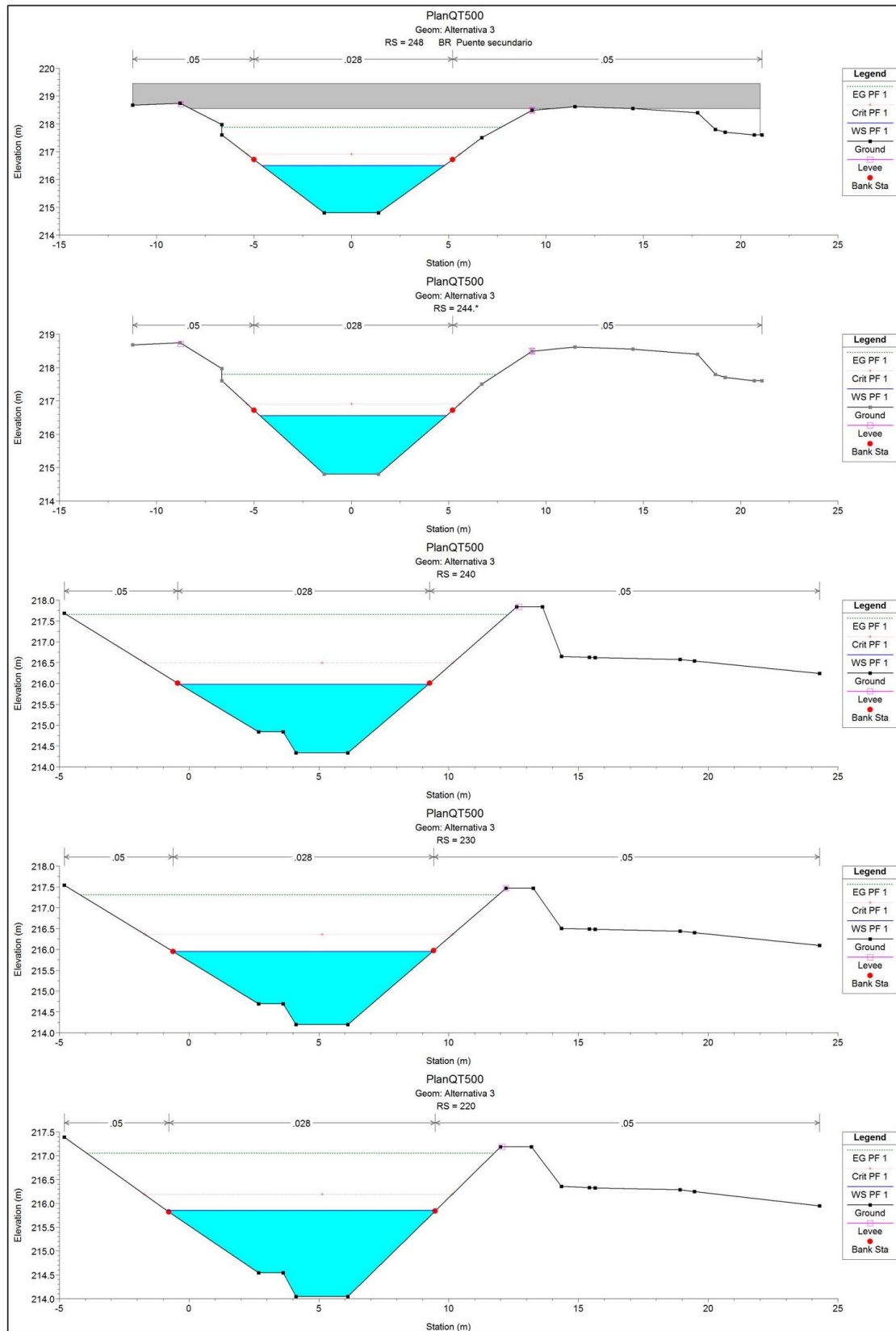


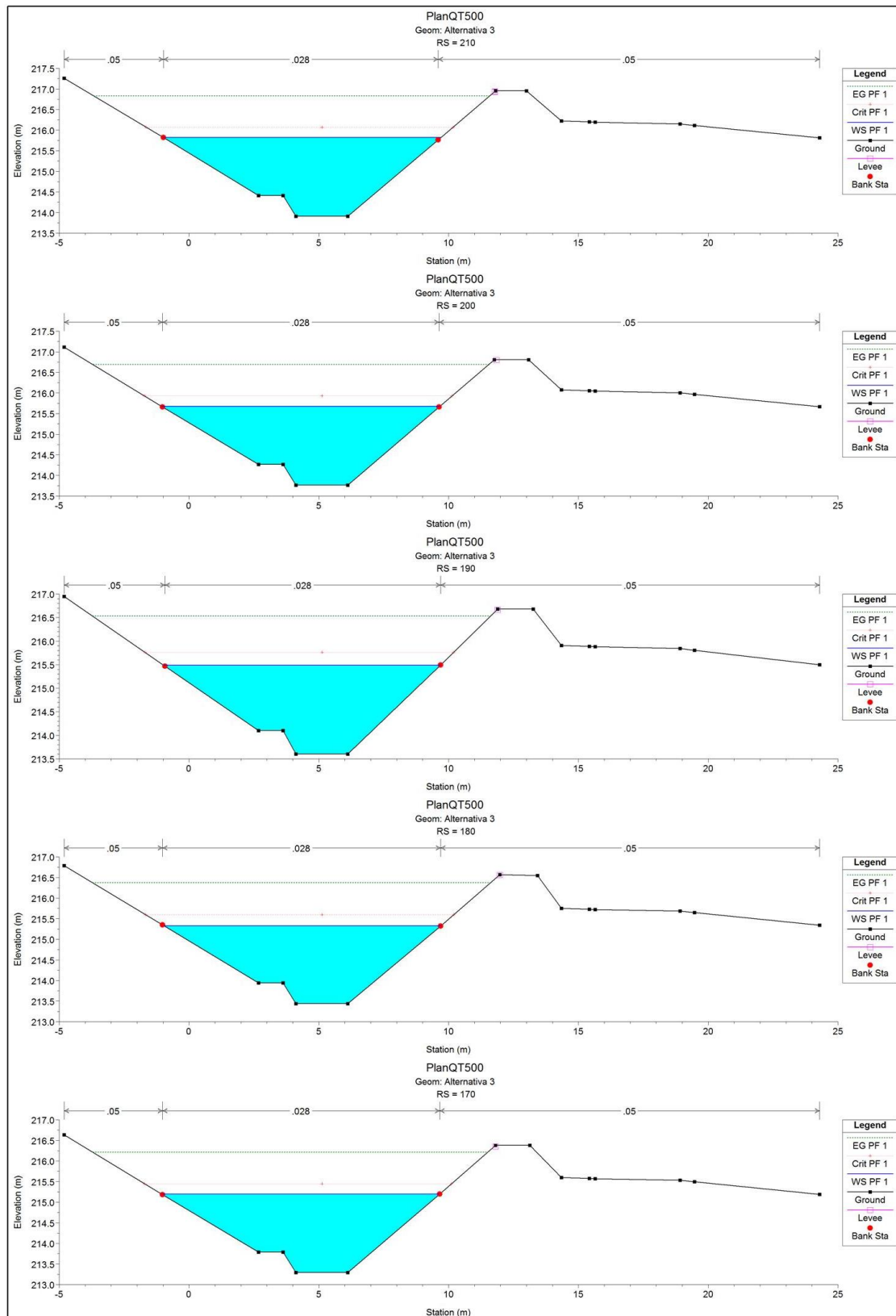


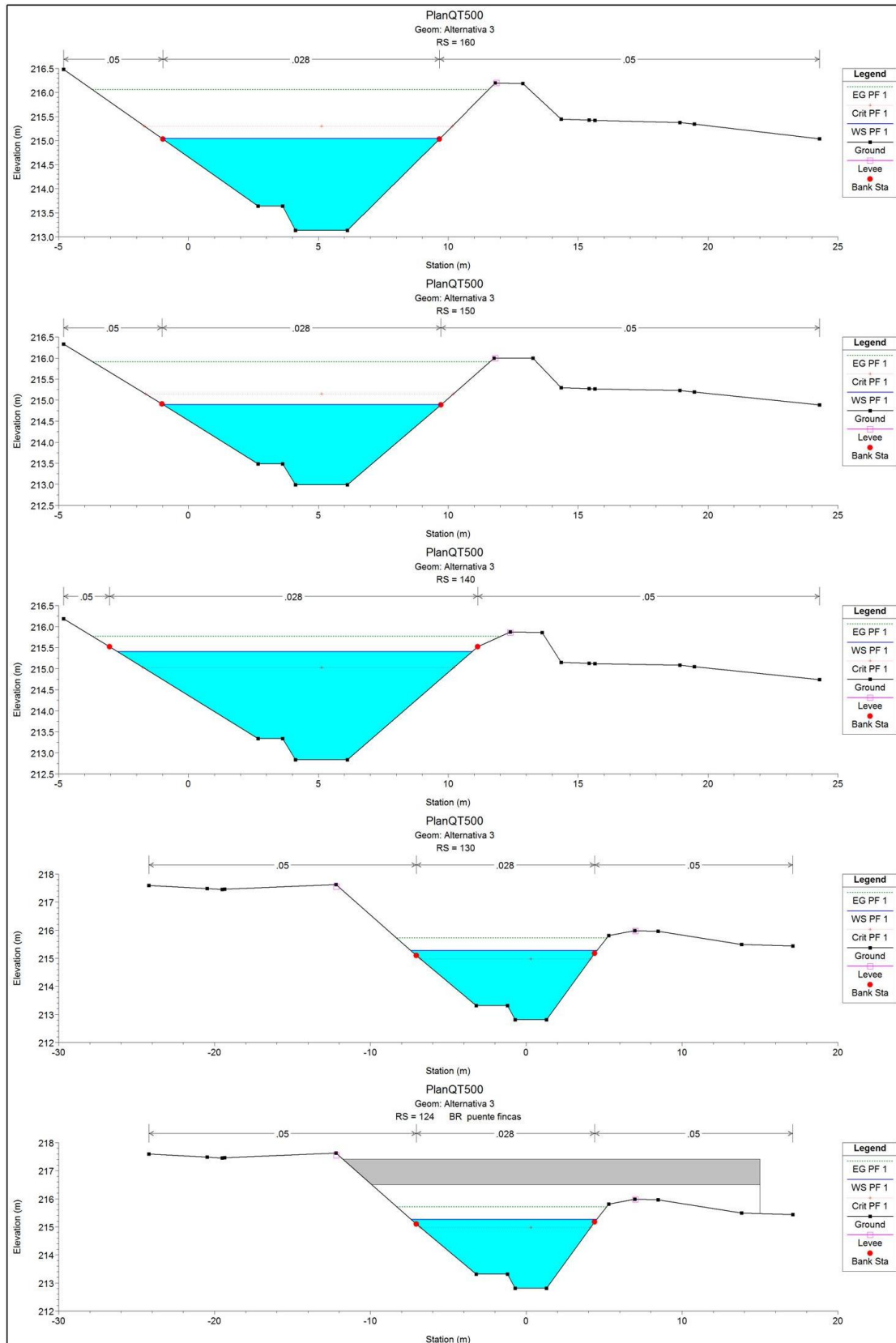


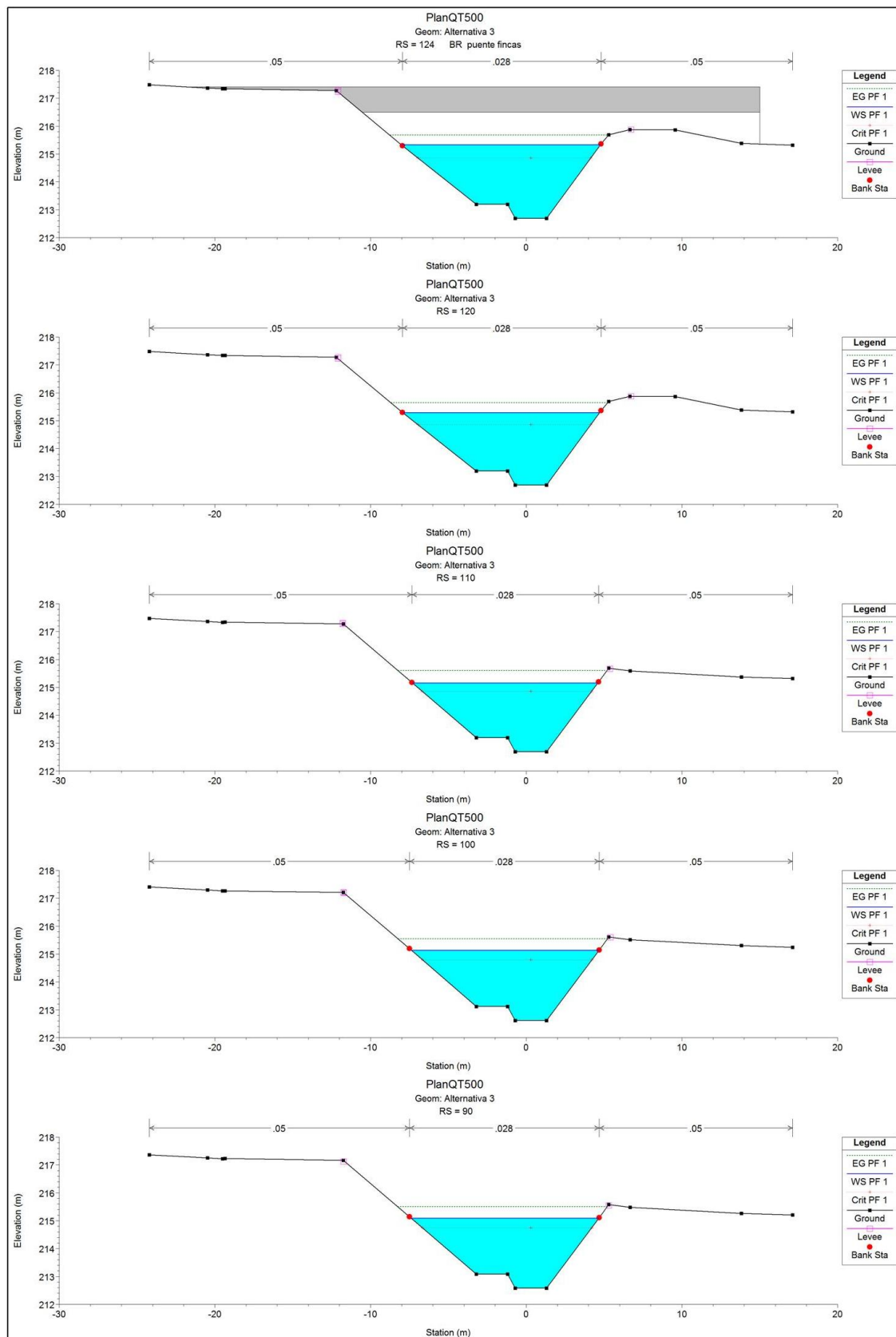


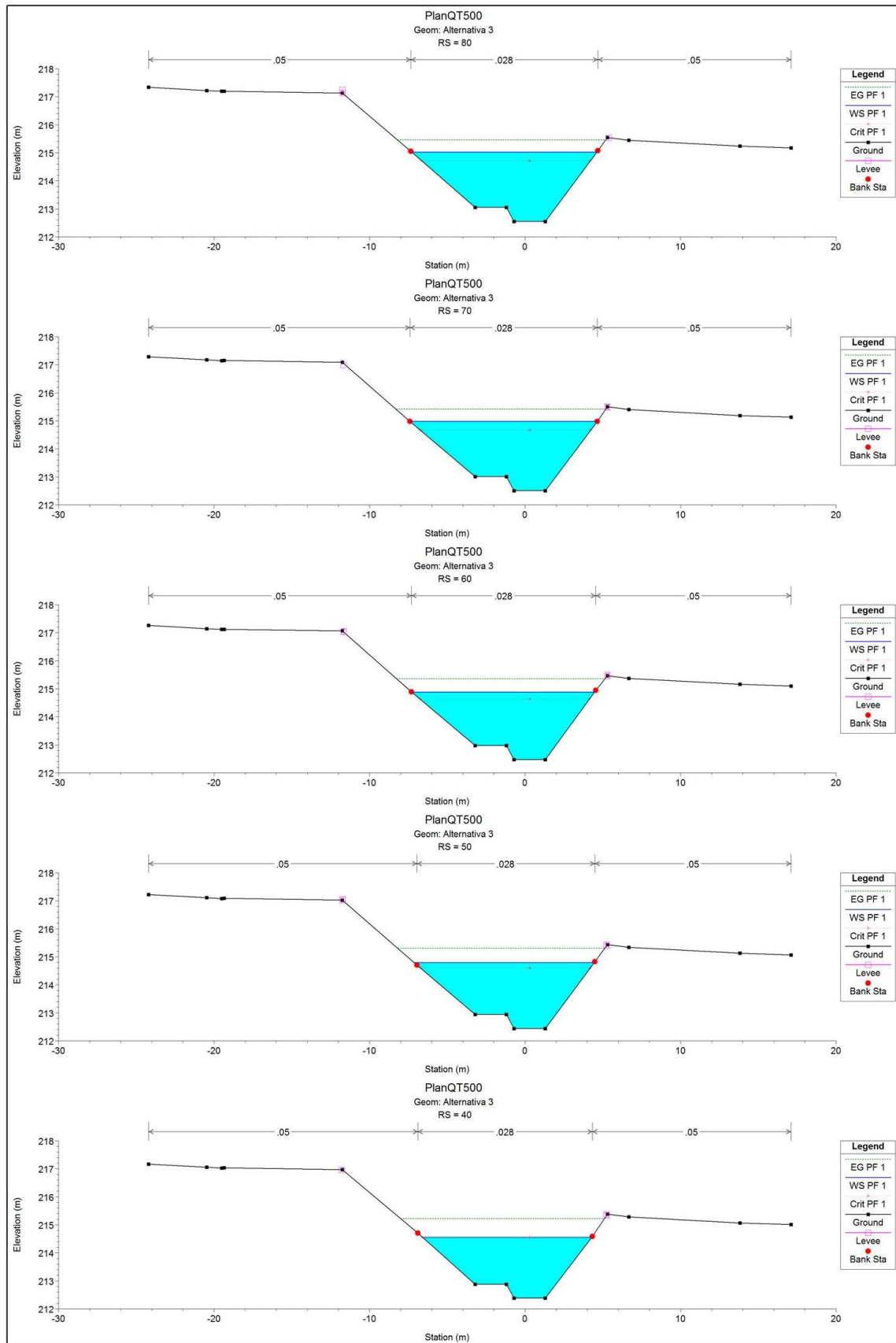


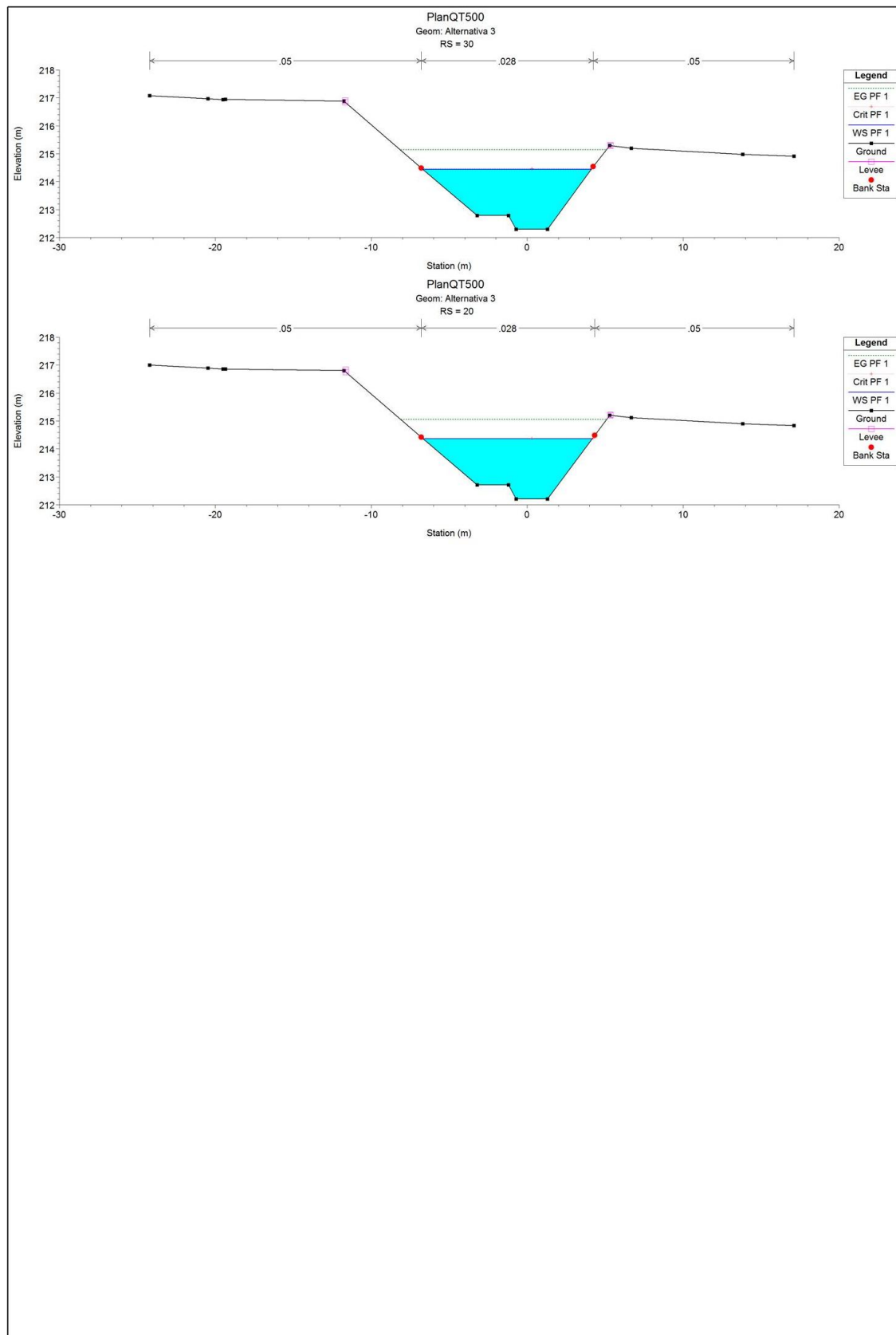








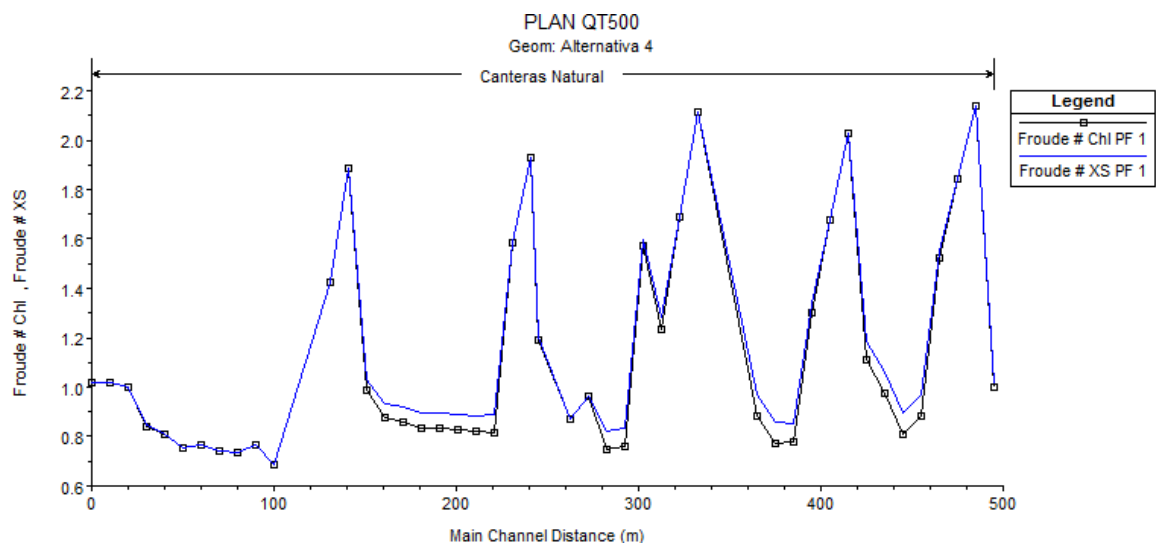
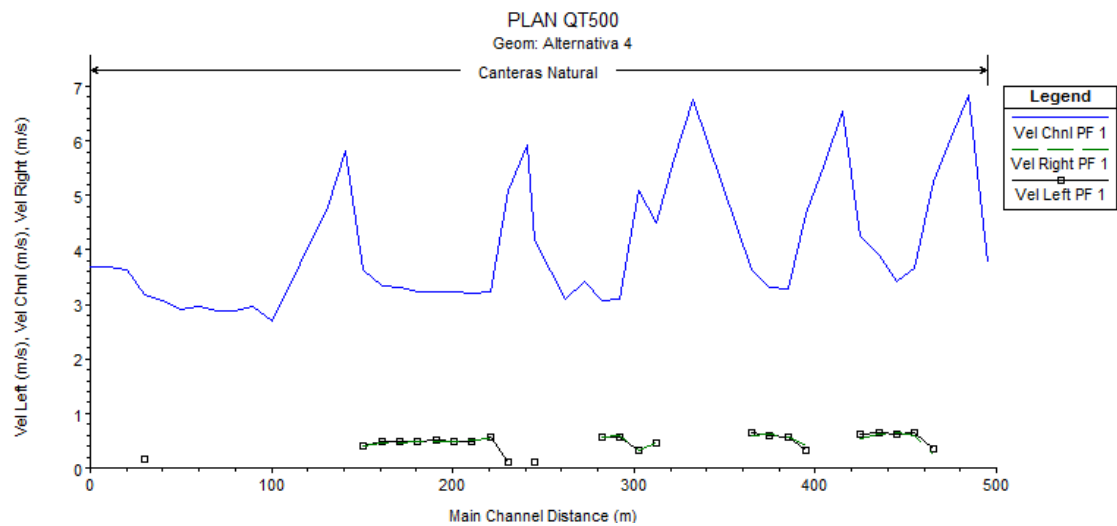
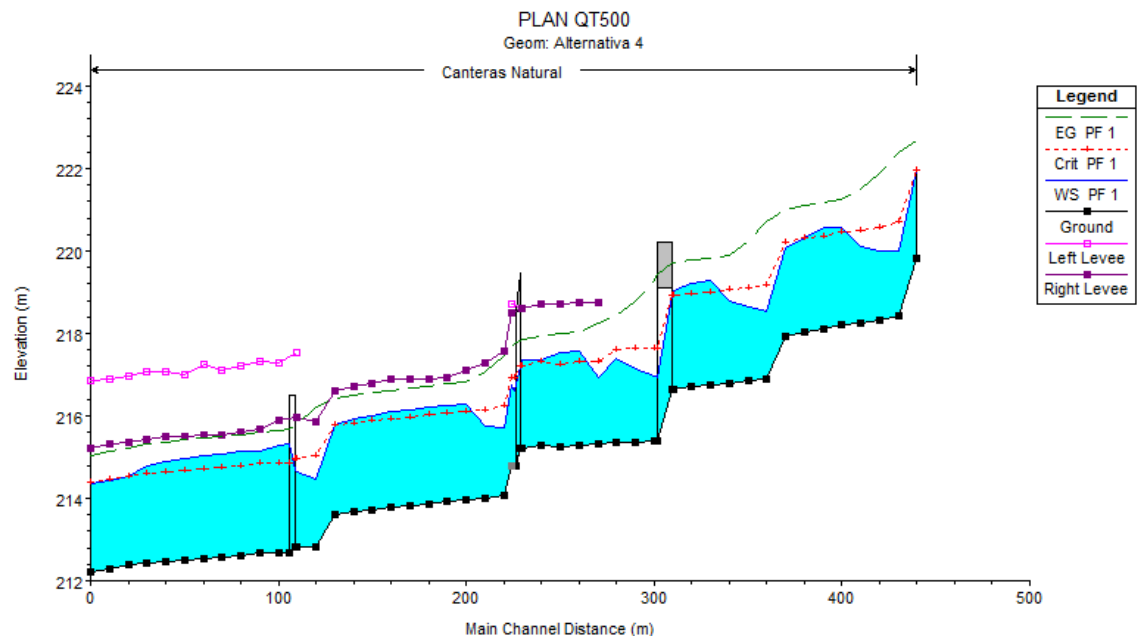


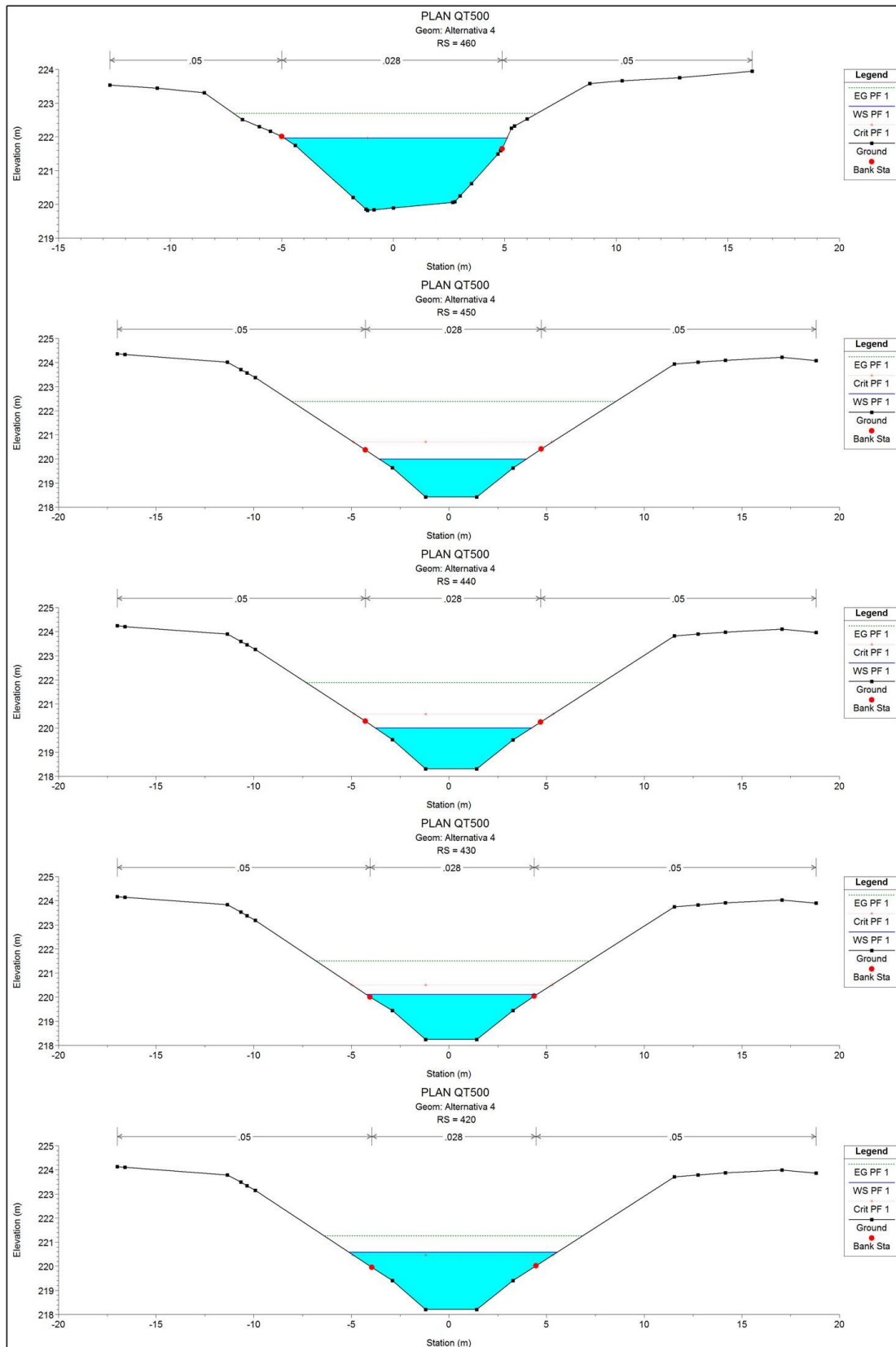


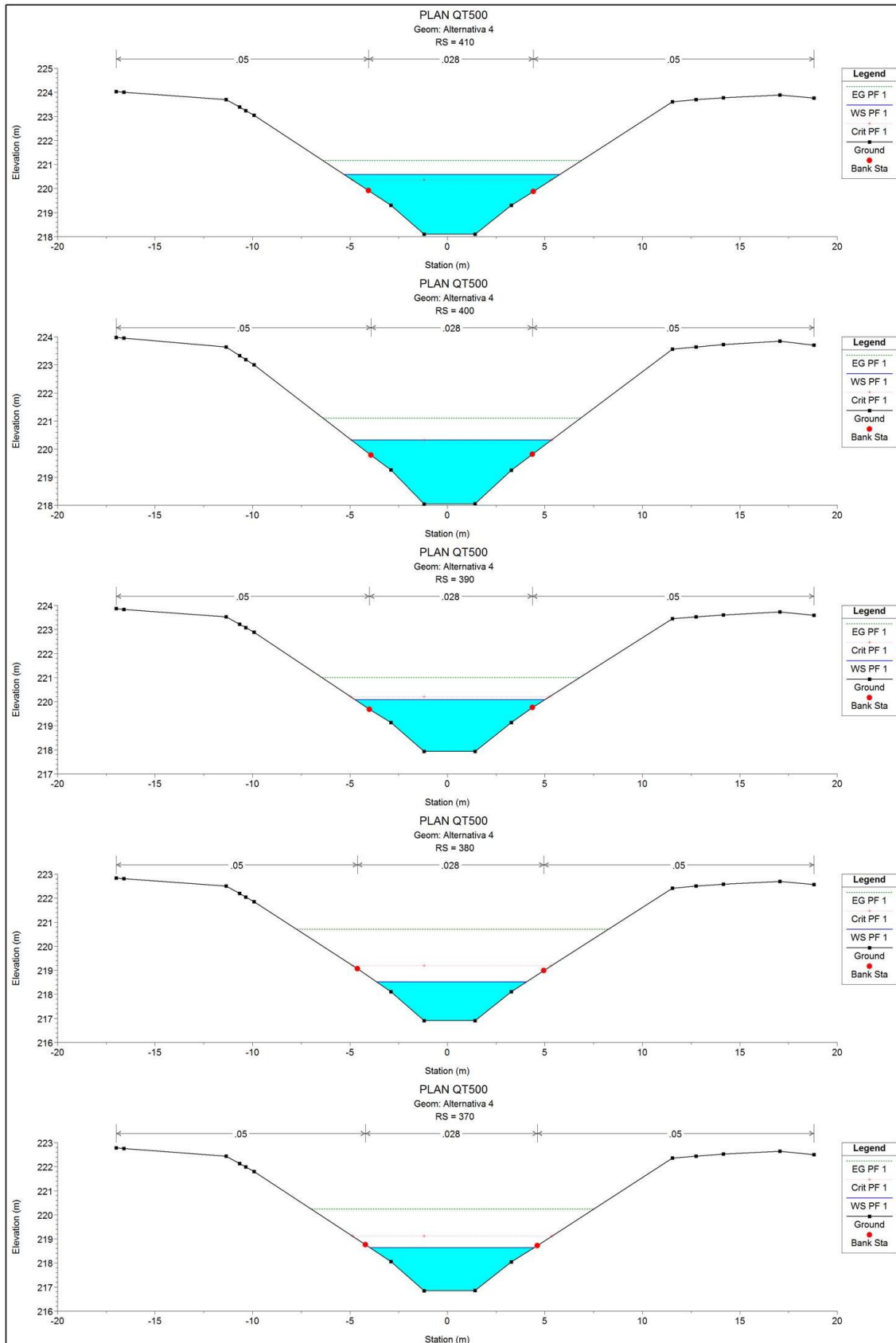


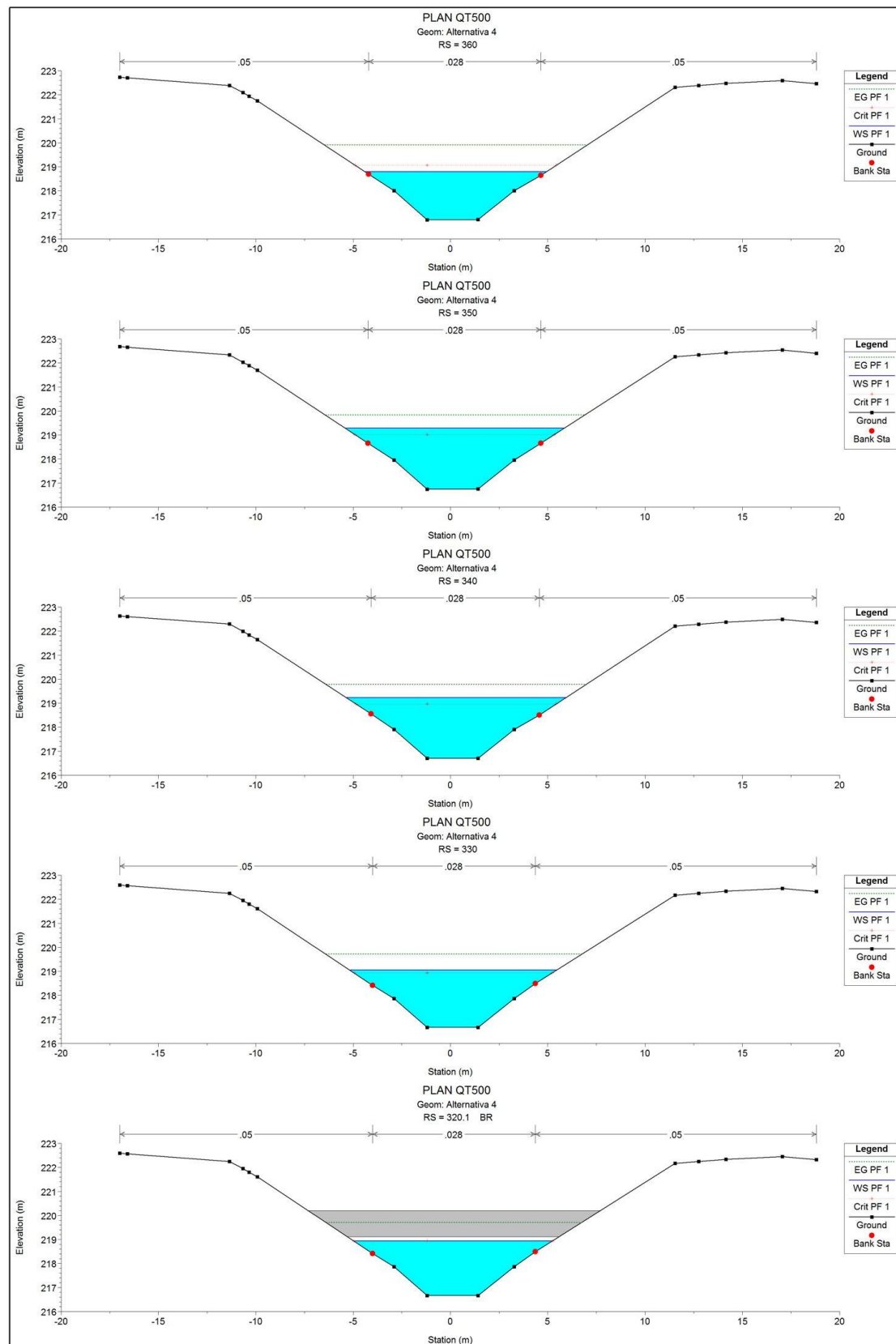
ALTERNATIVA 4:

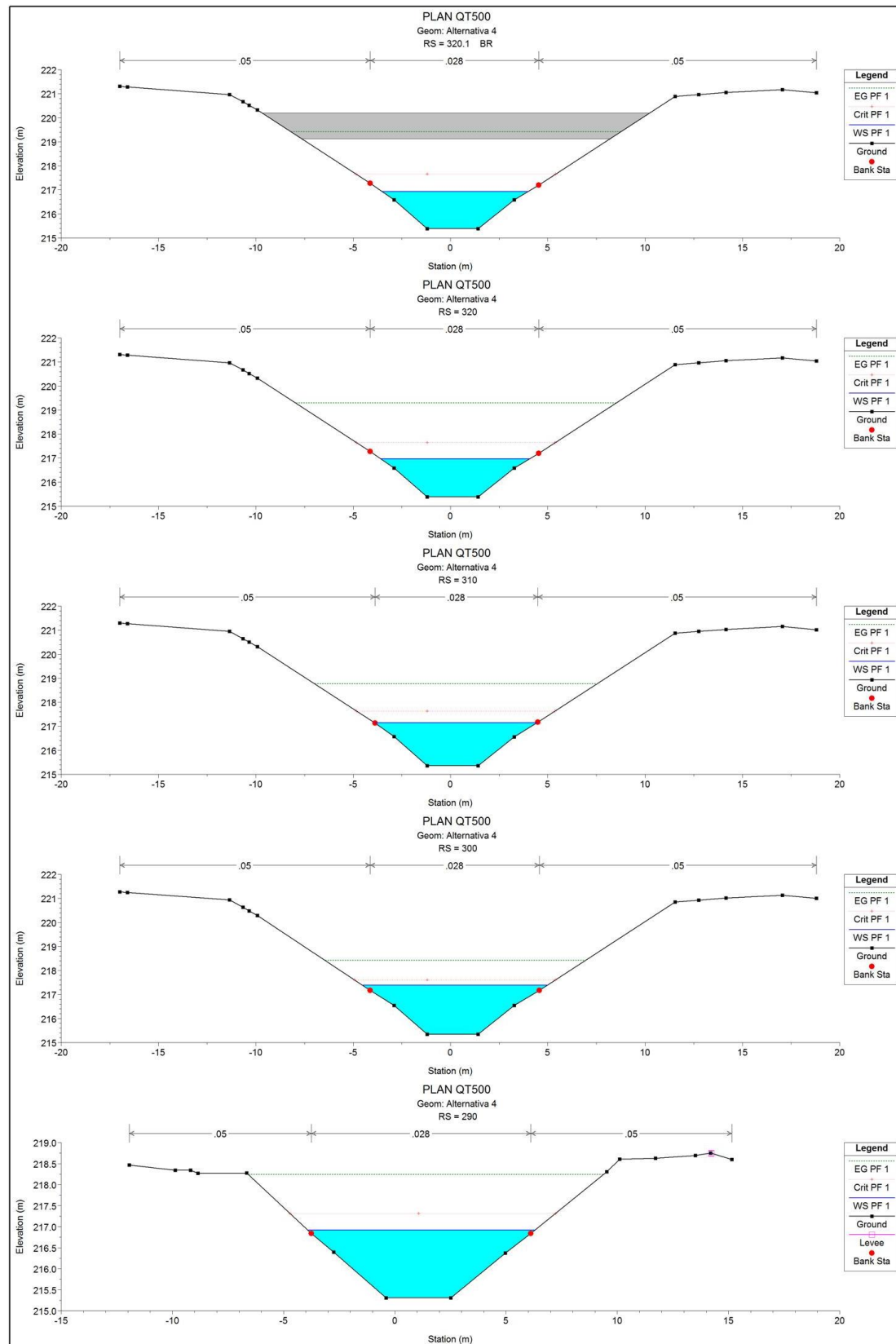
RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN CON CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS

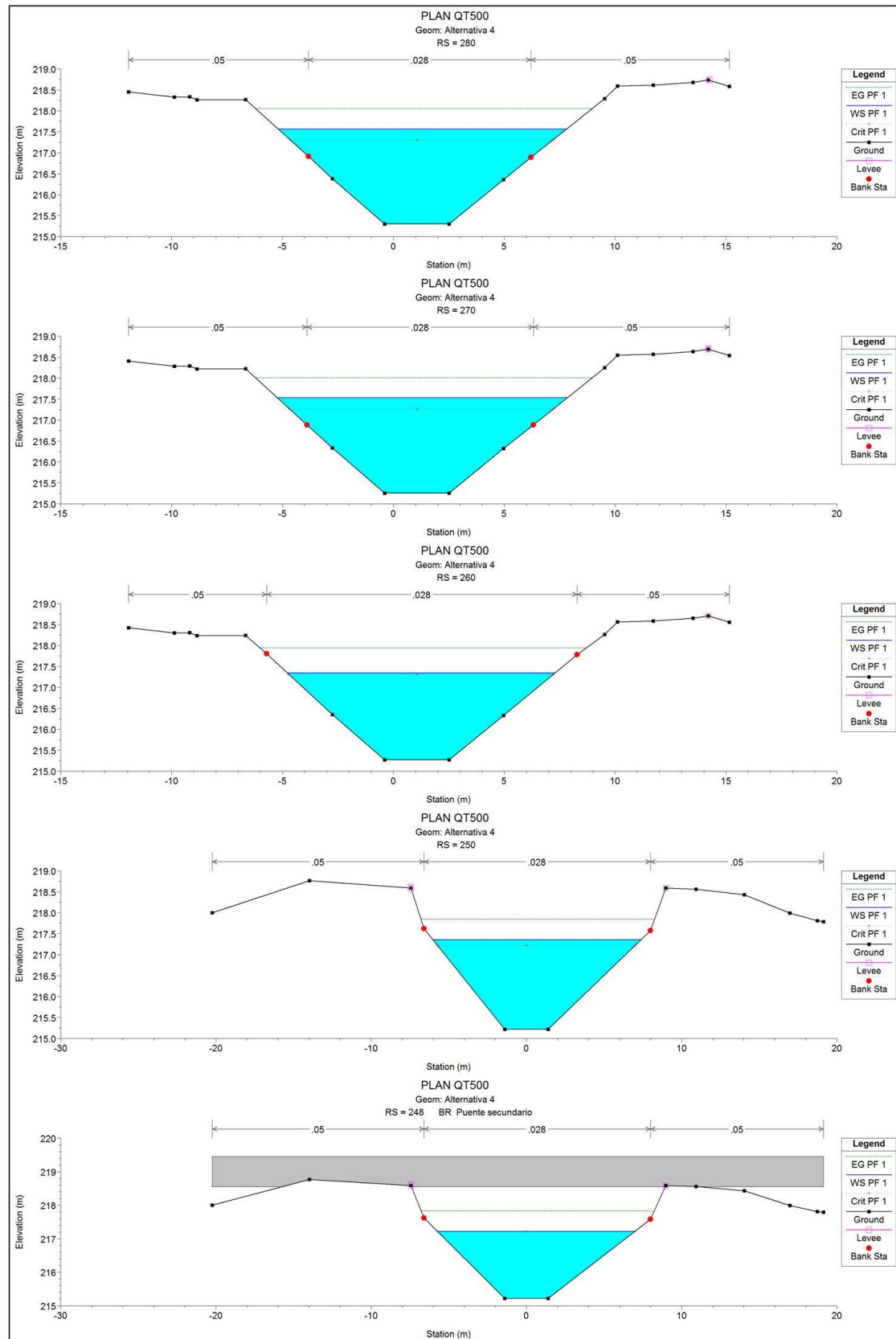


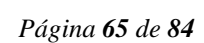


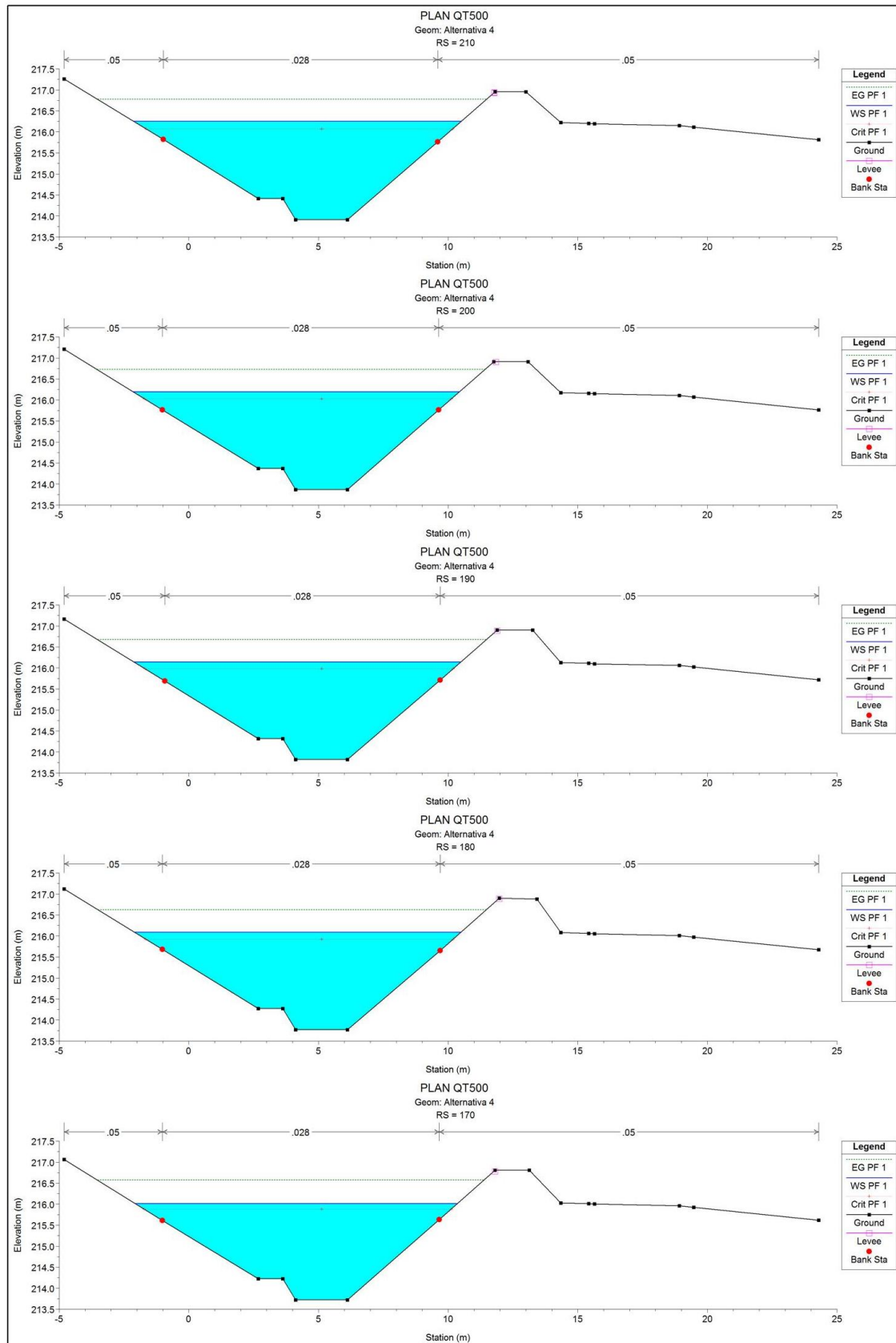


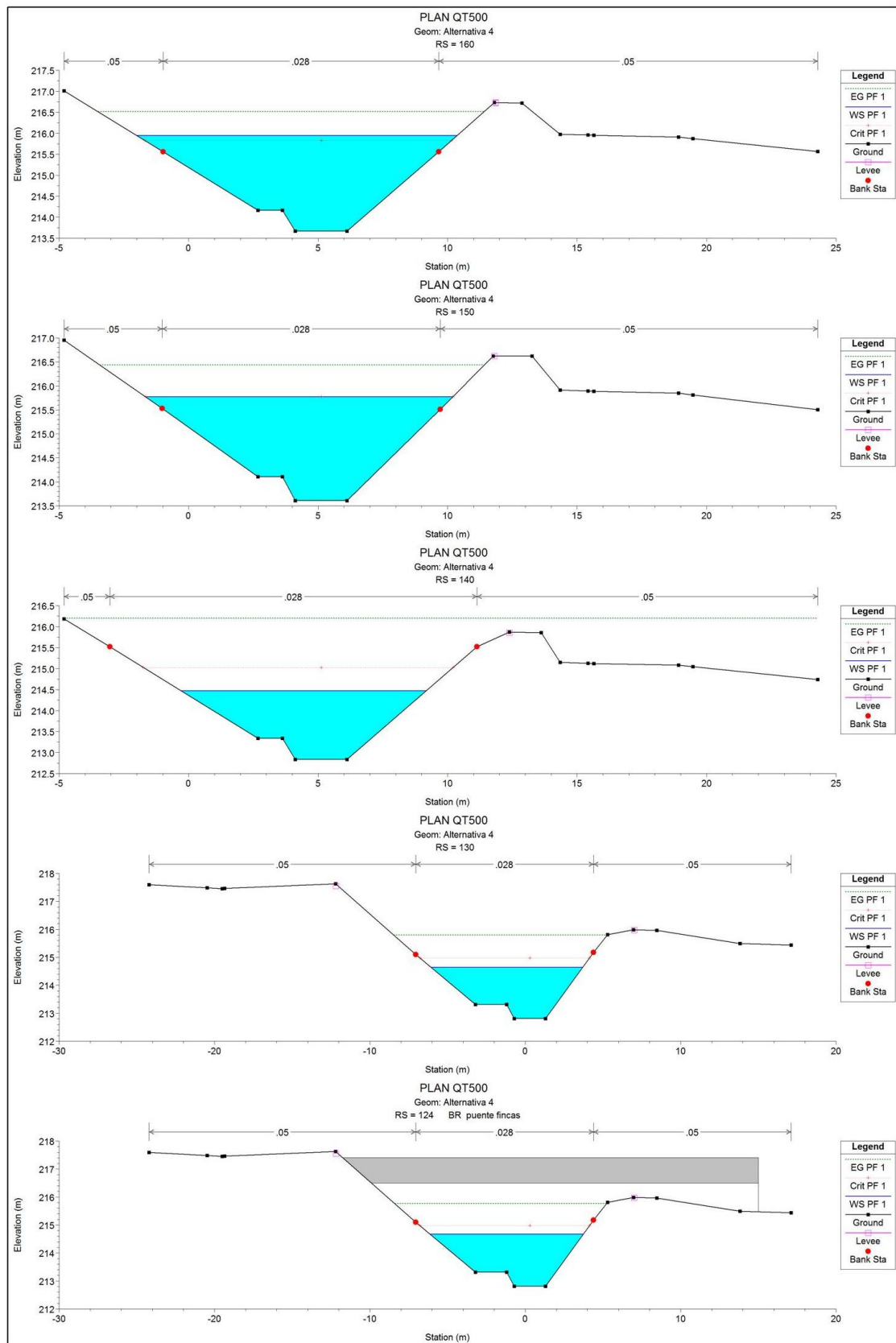


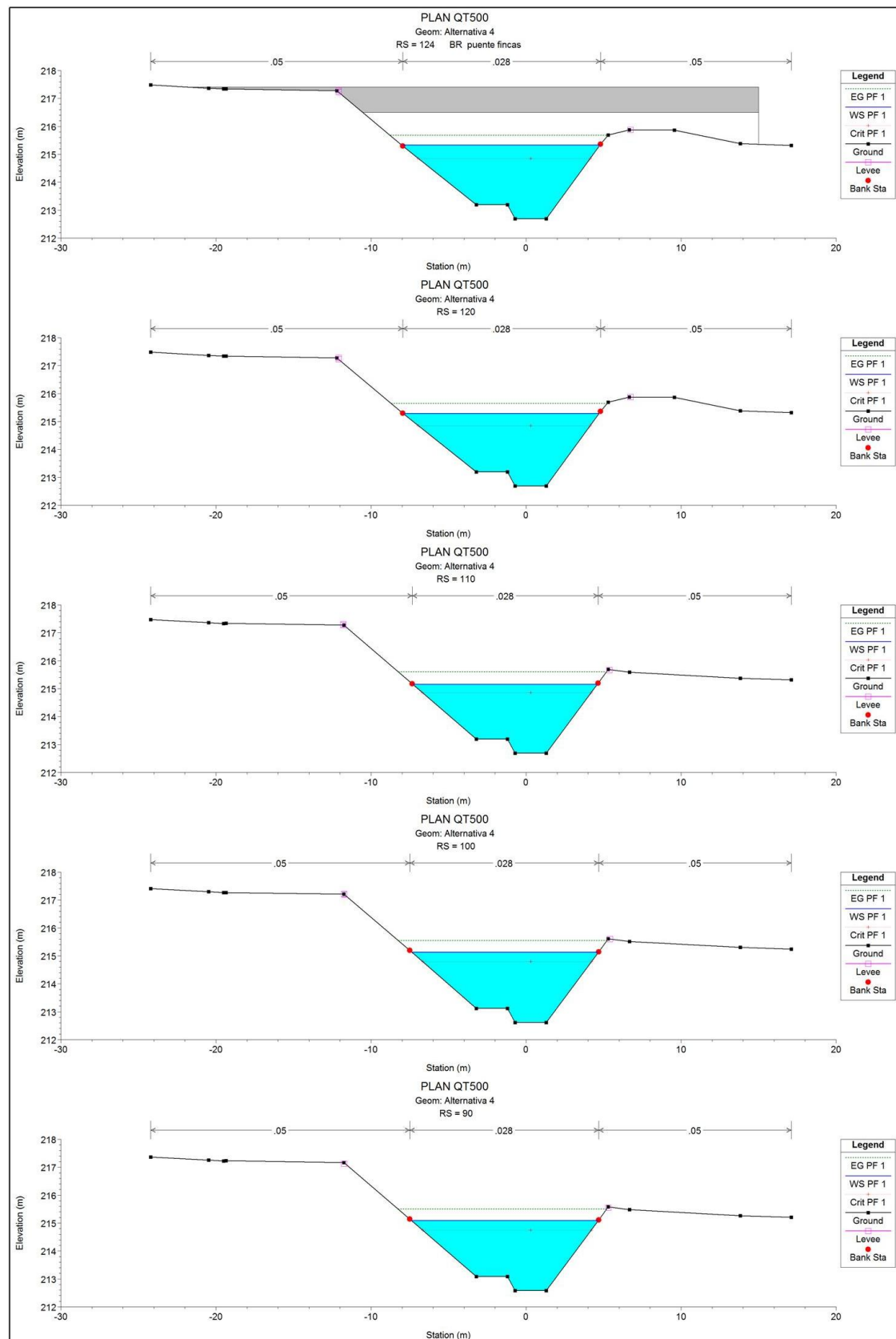


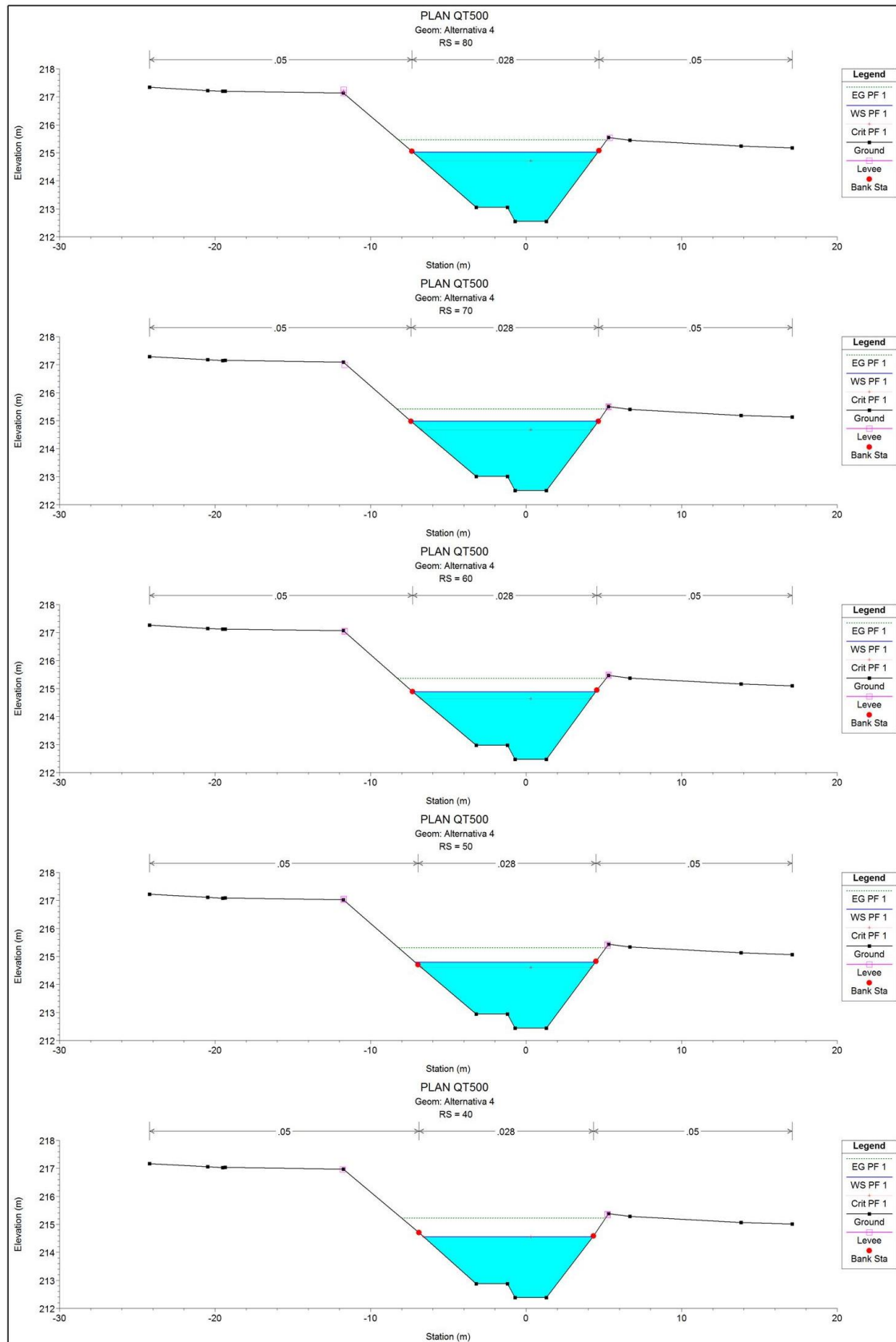


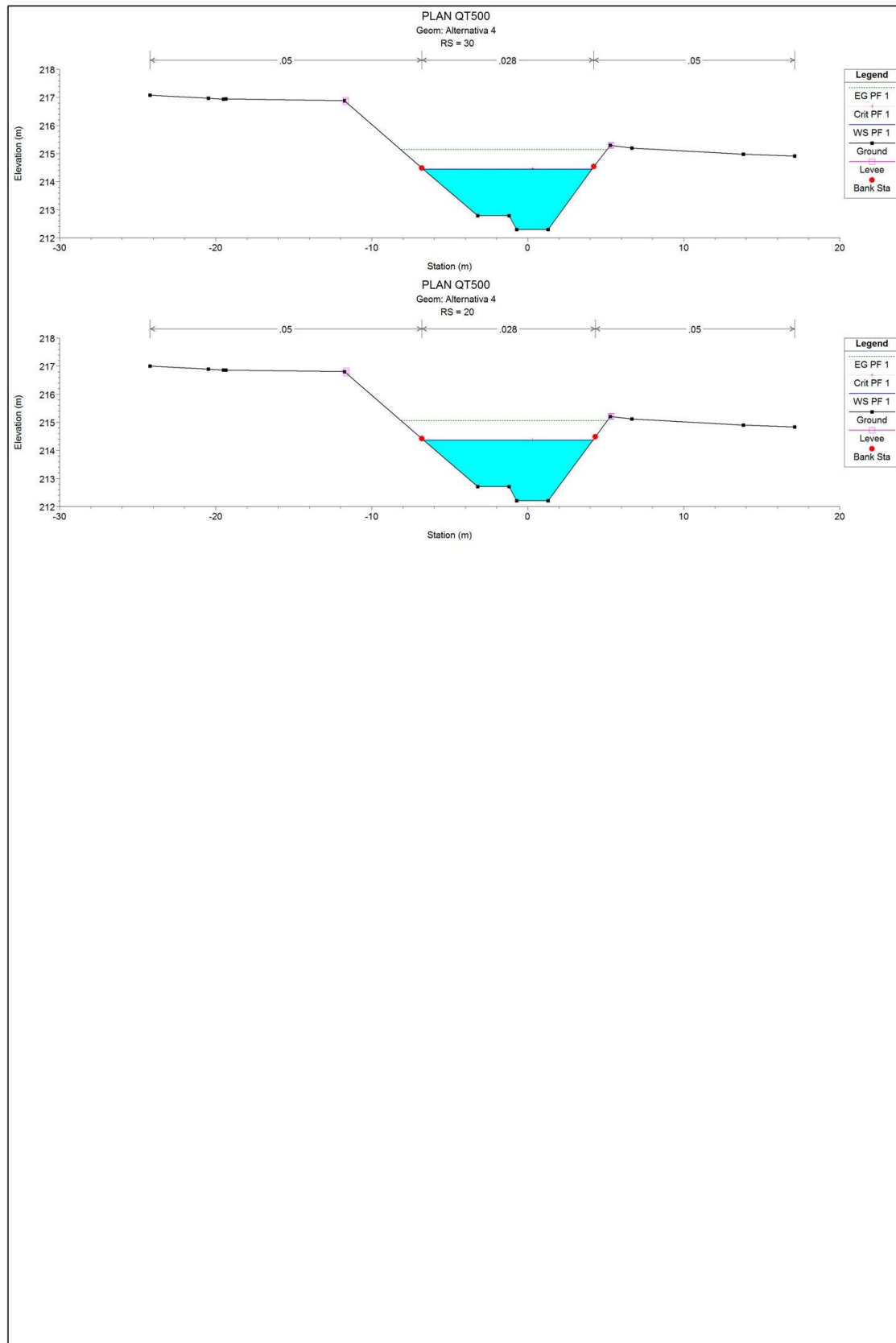








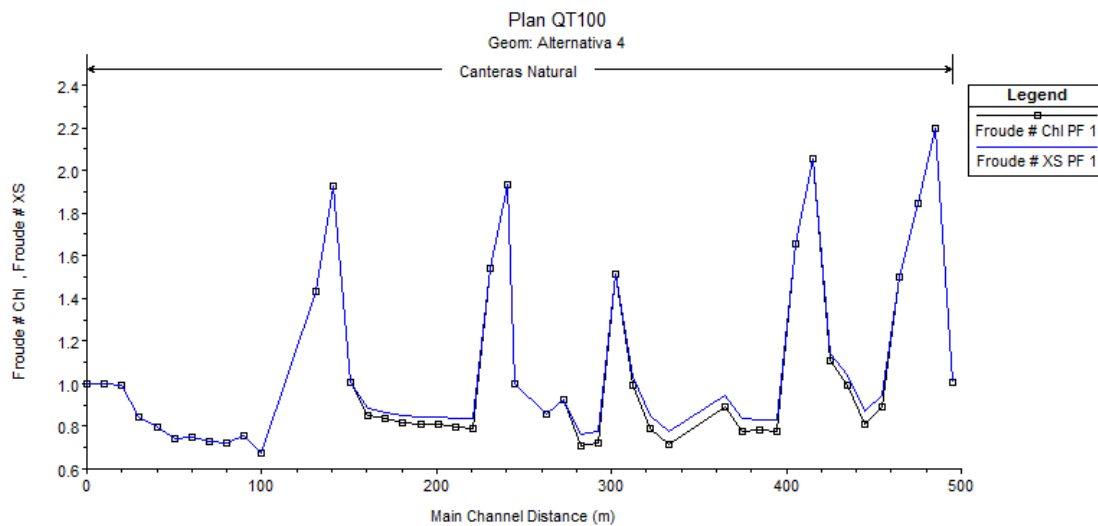
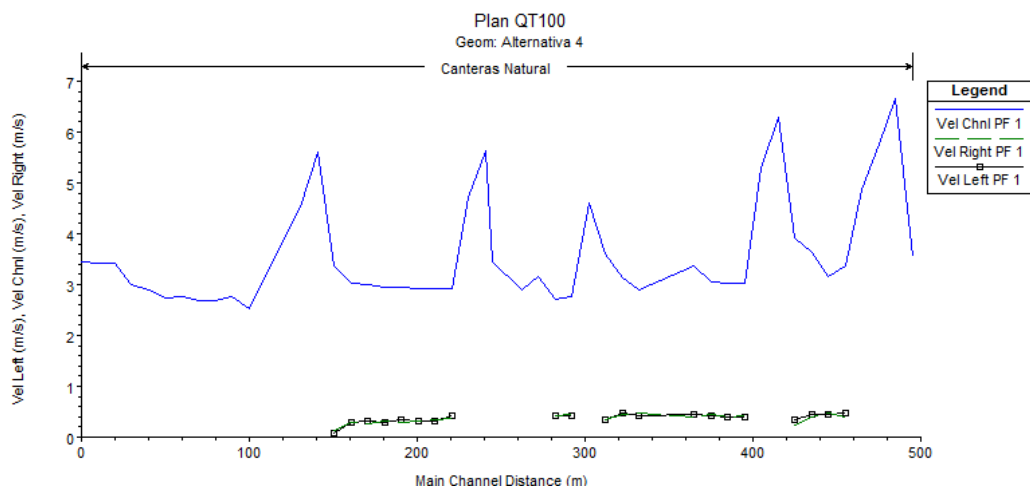
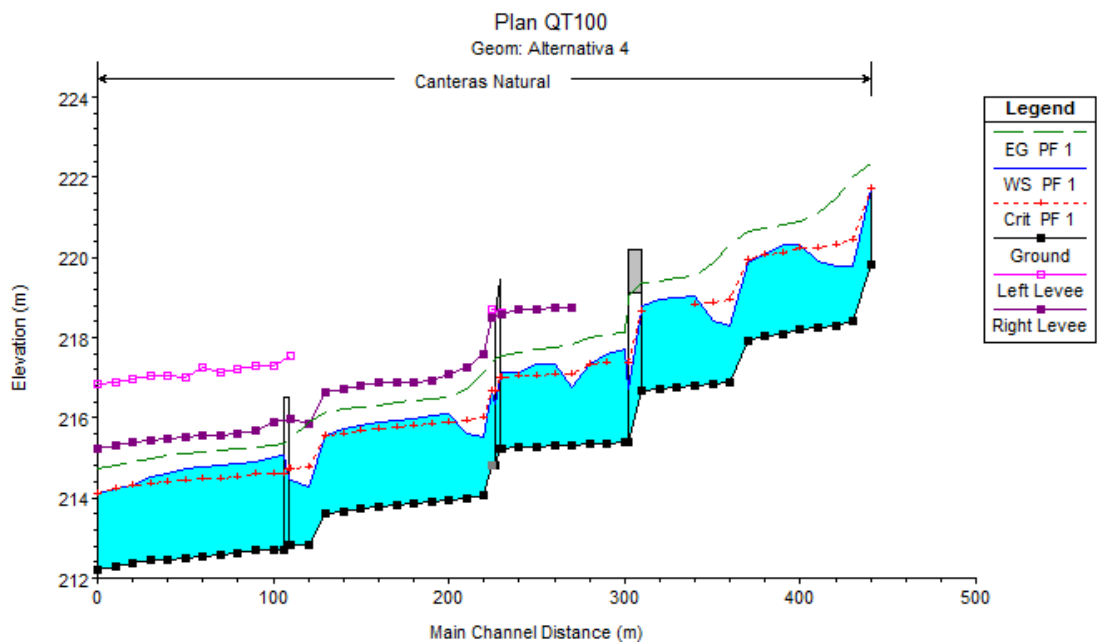


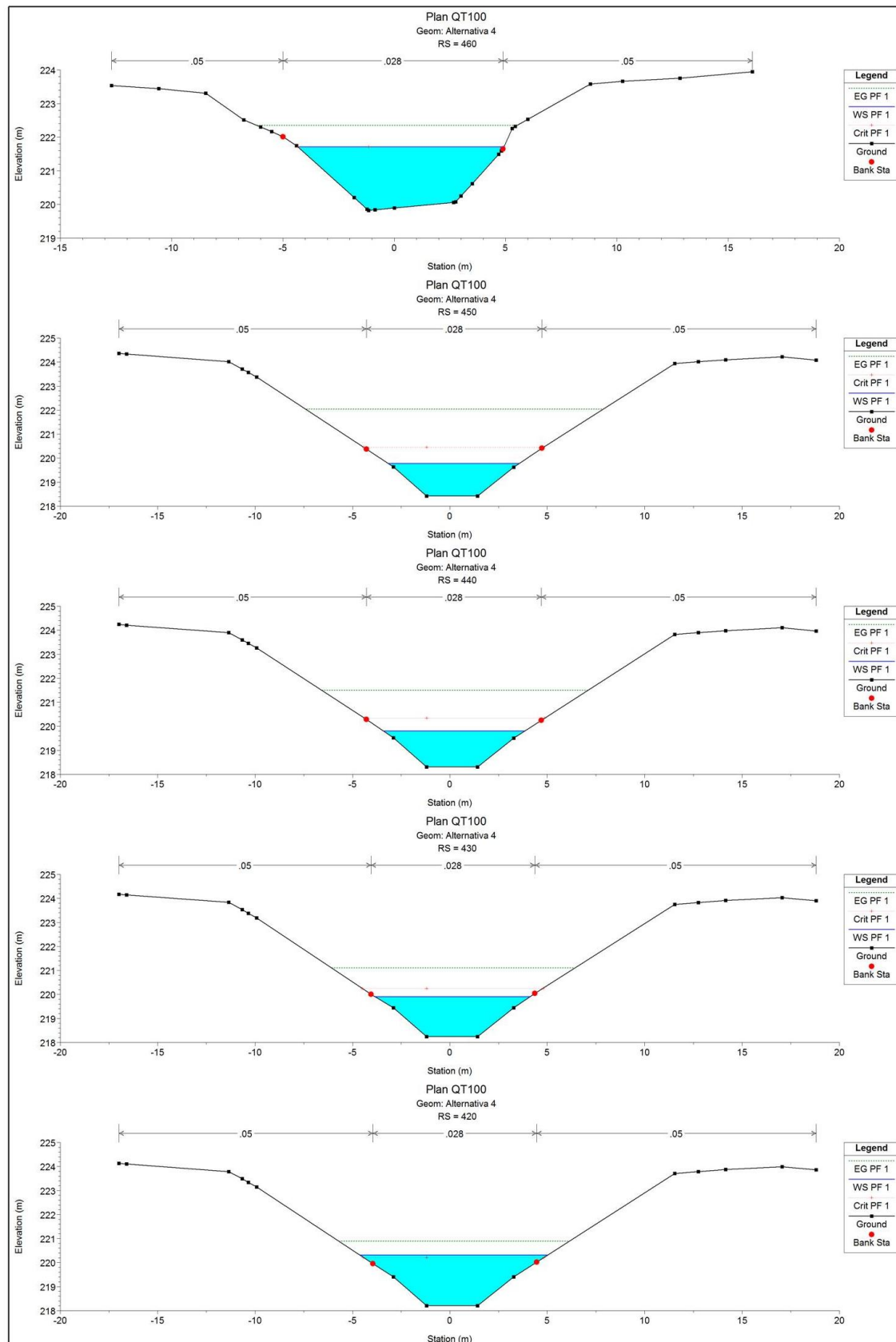


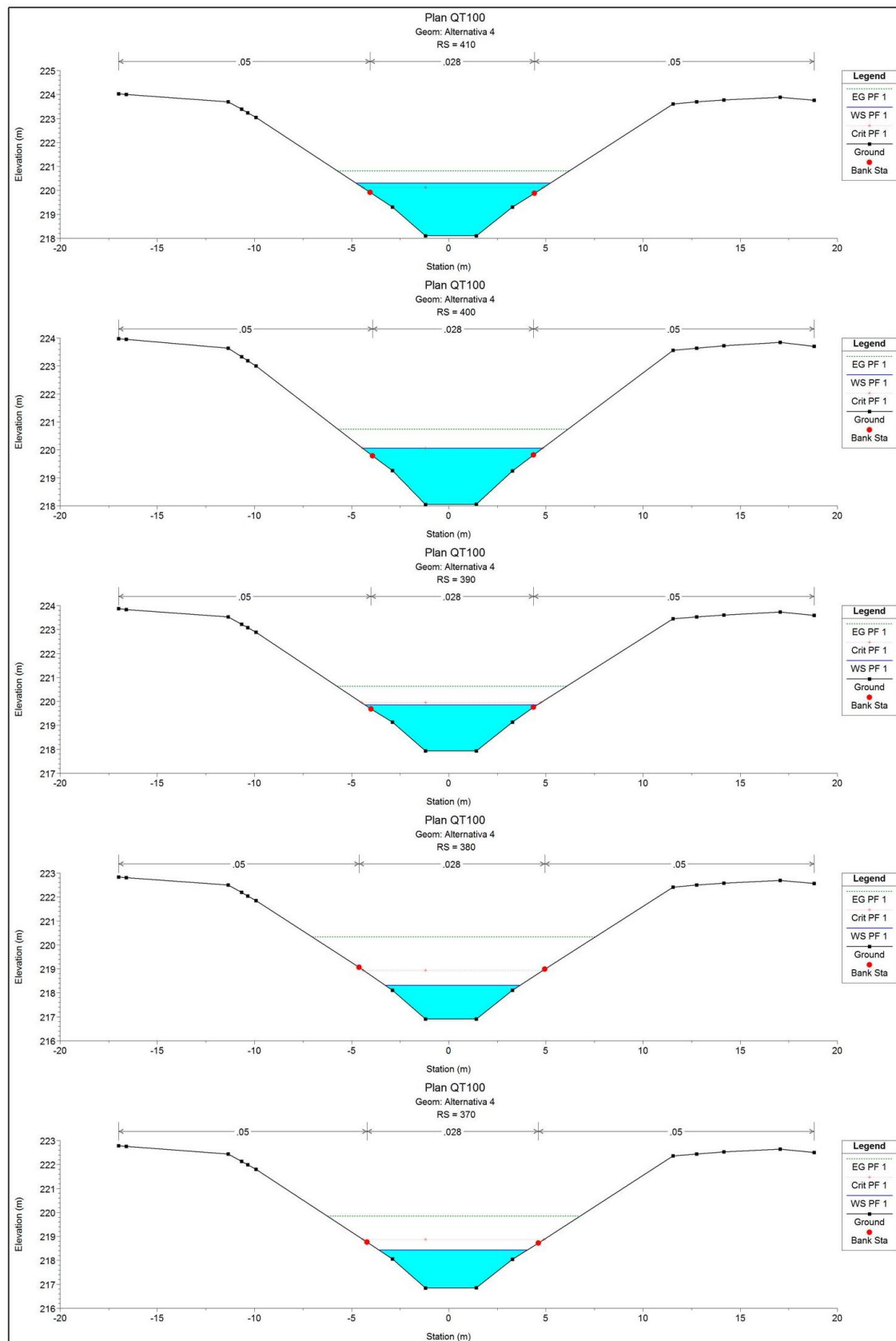


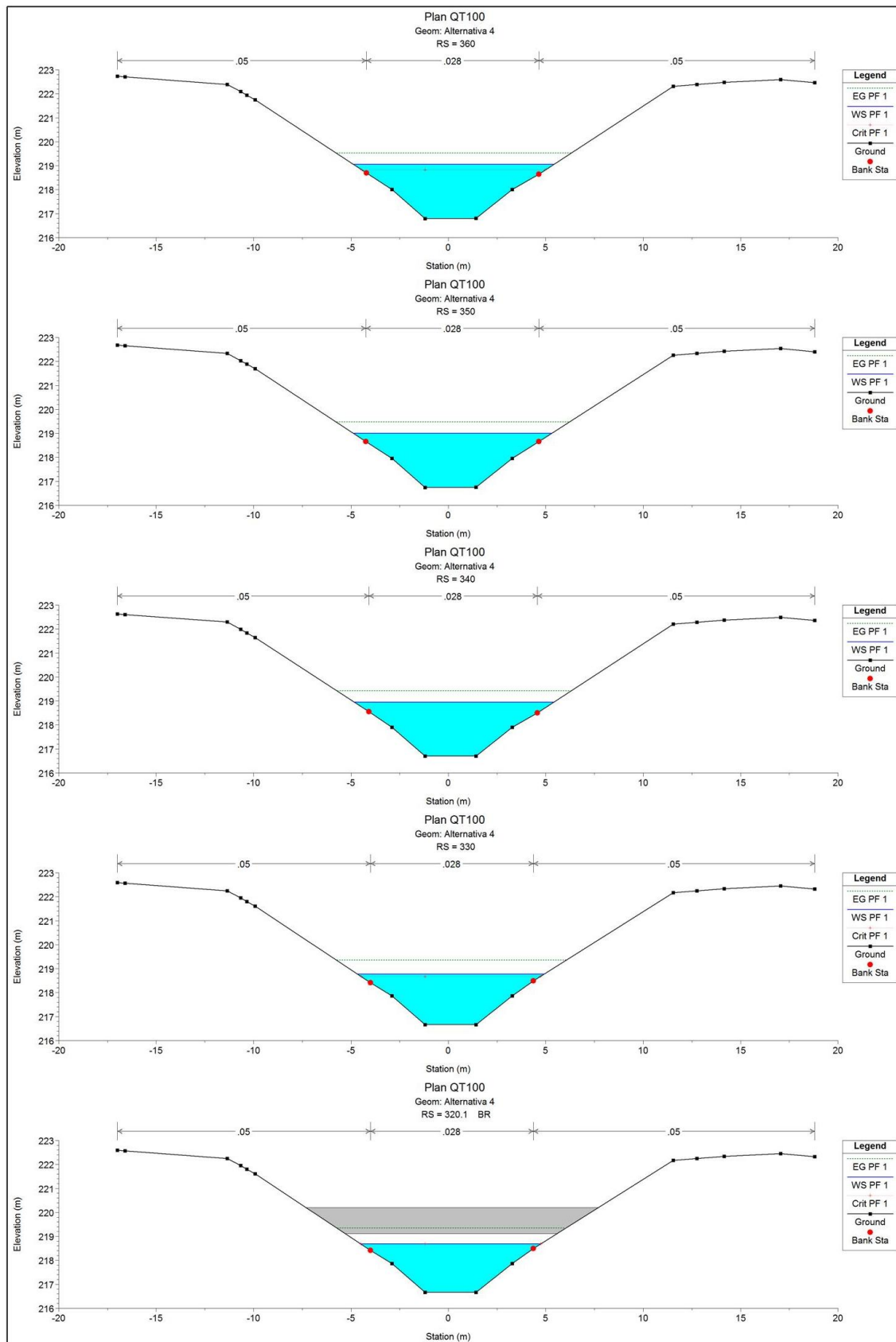
ALTERNATIVA 4:

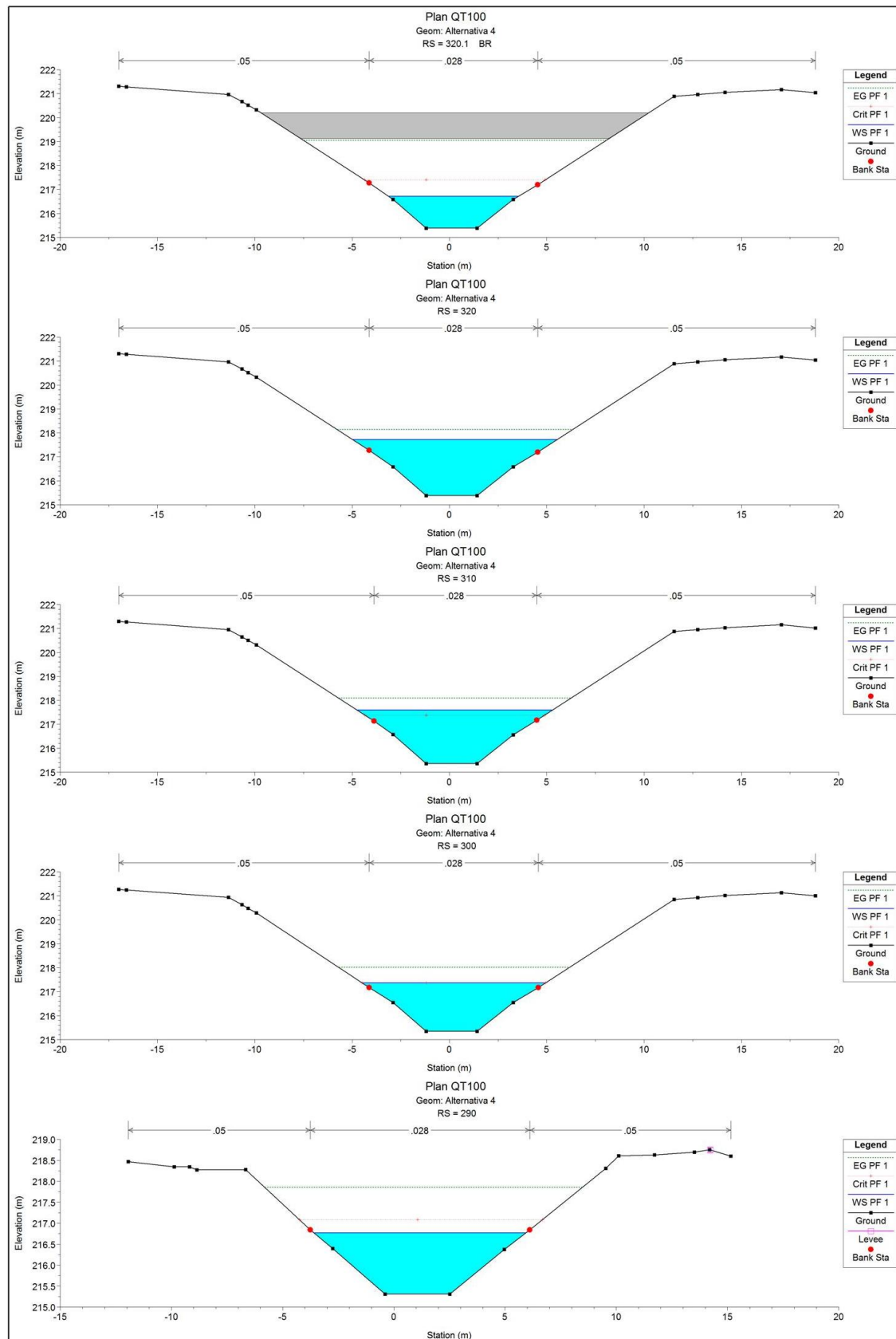
RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN CON CAUDAL ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS

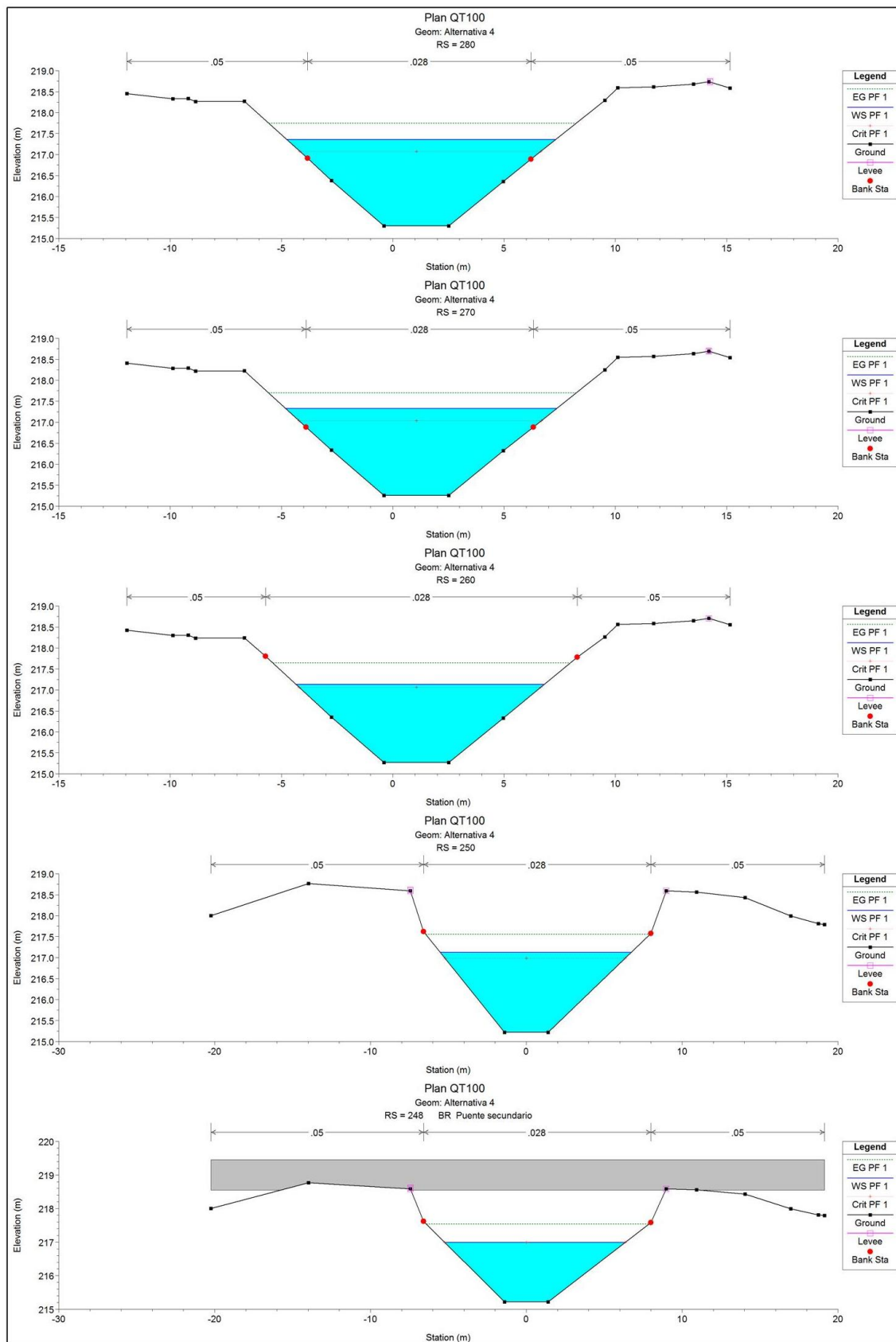


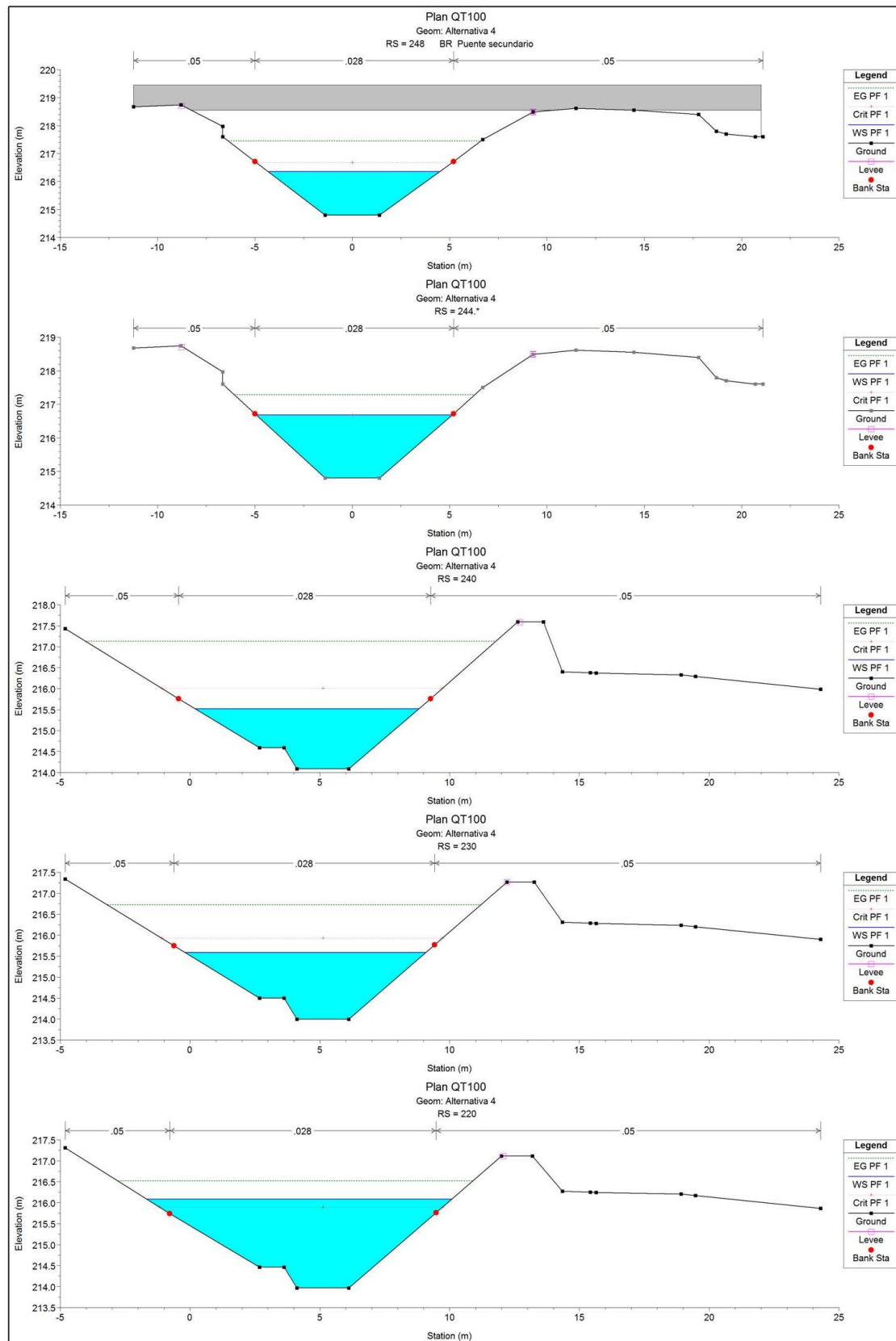


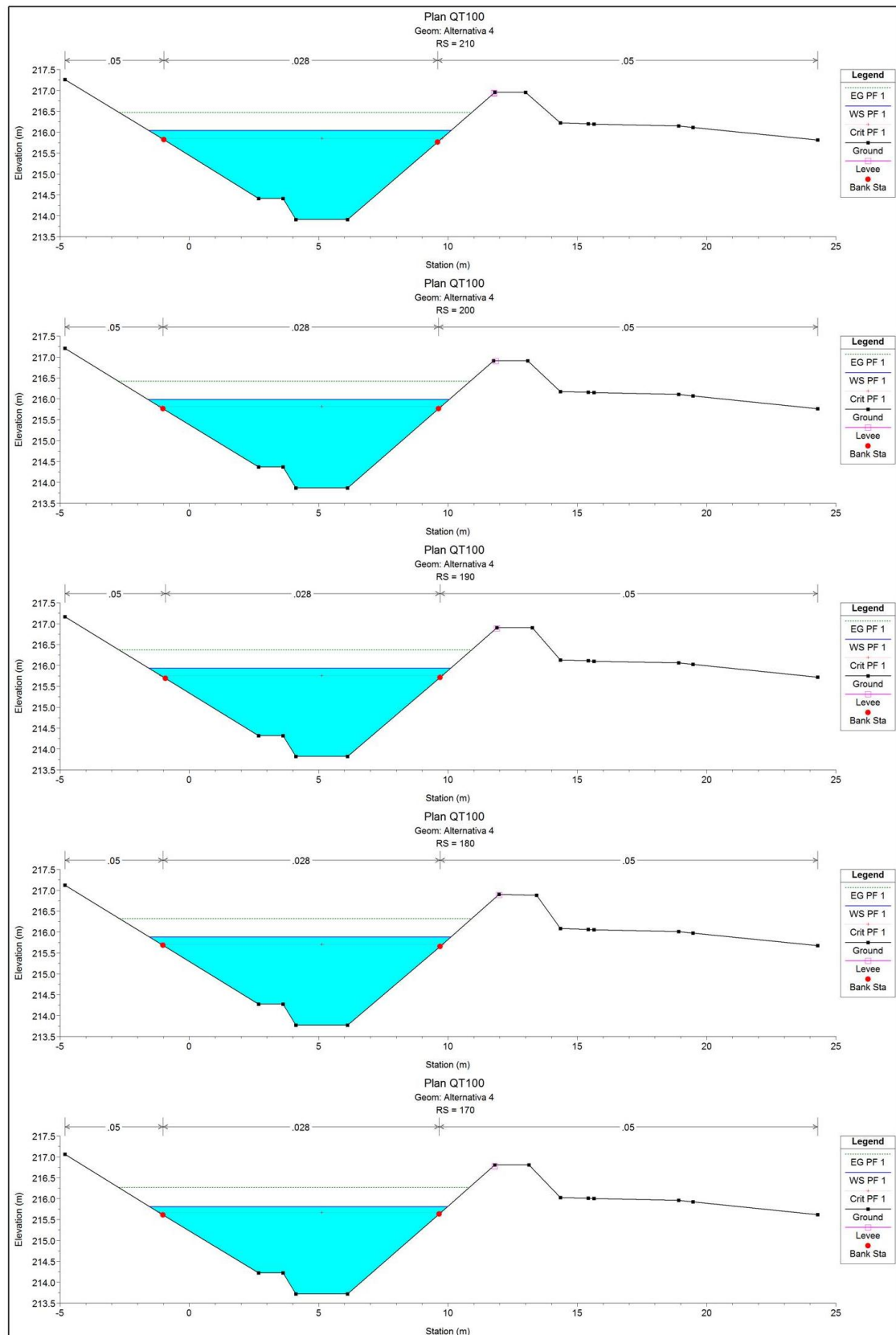


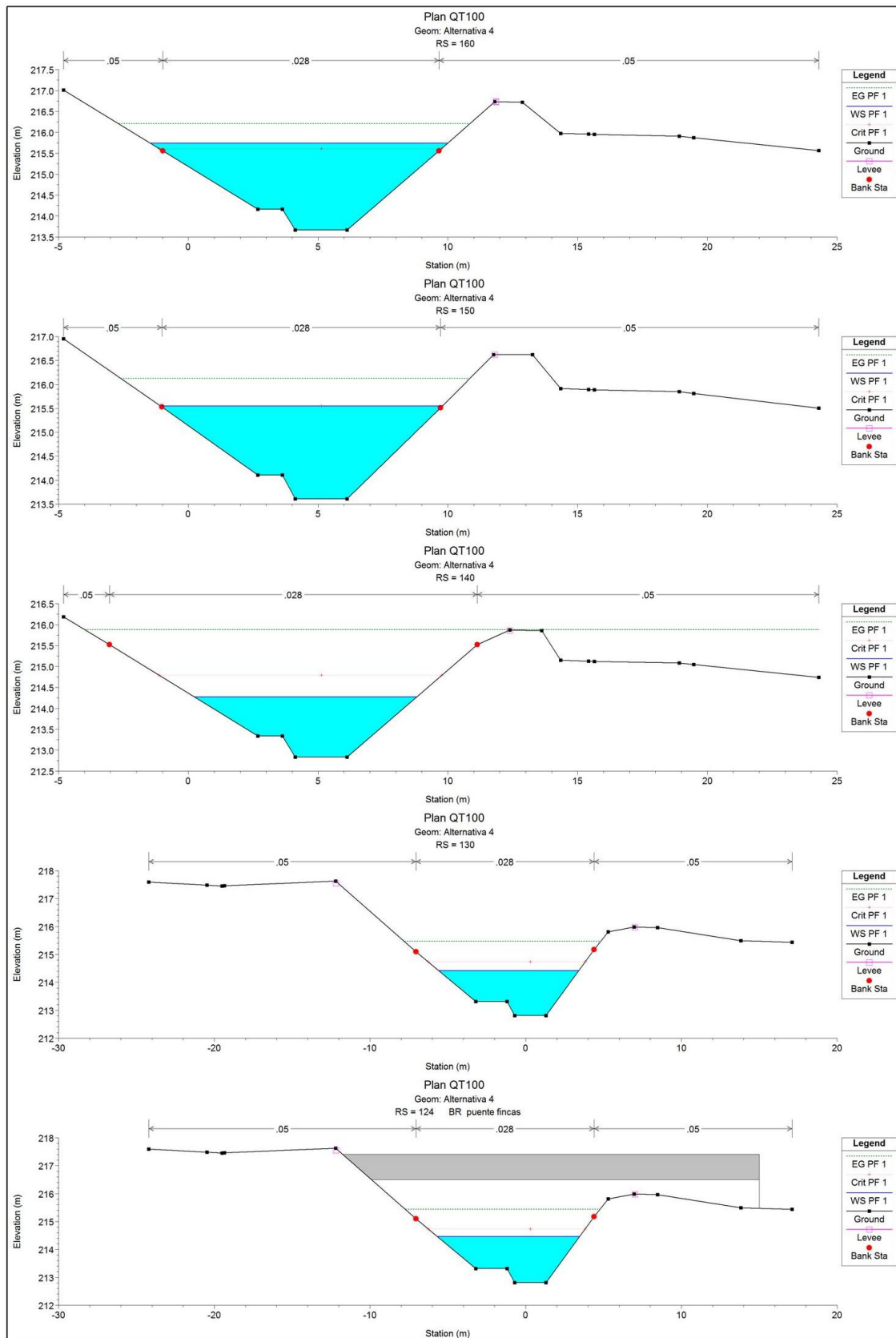


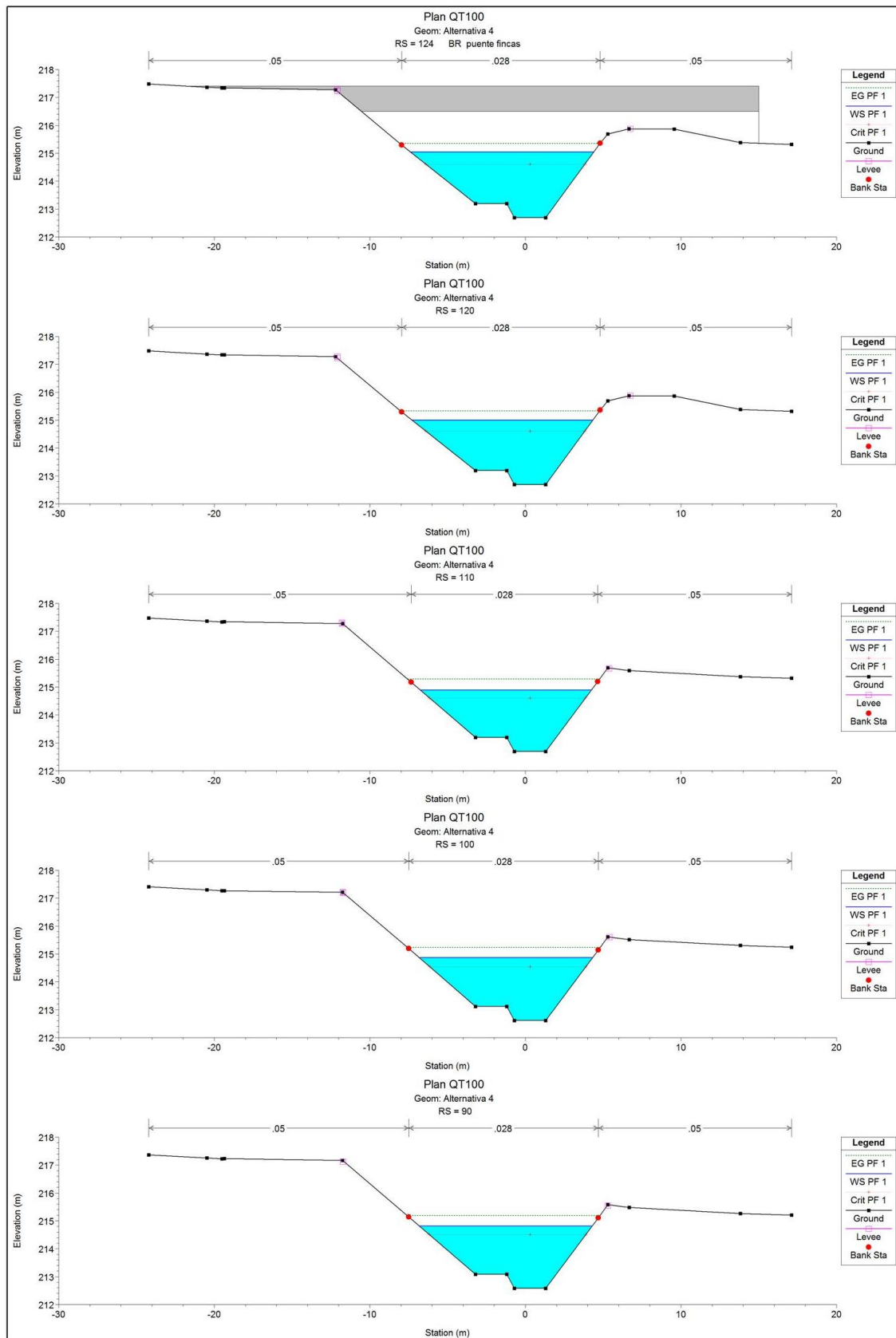


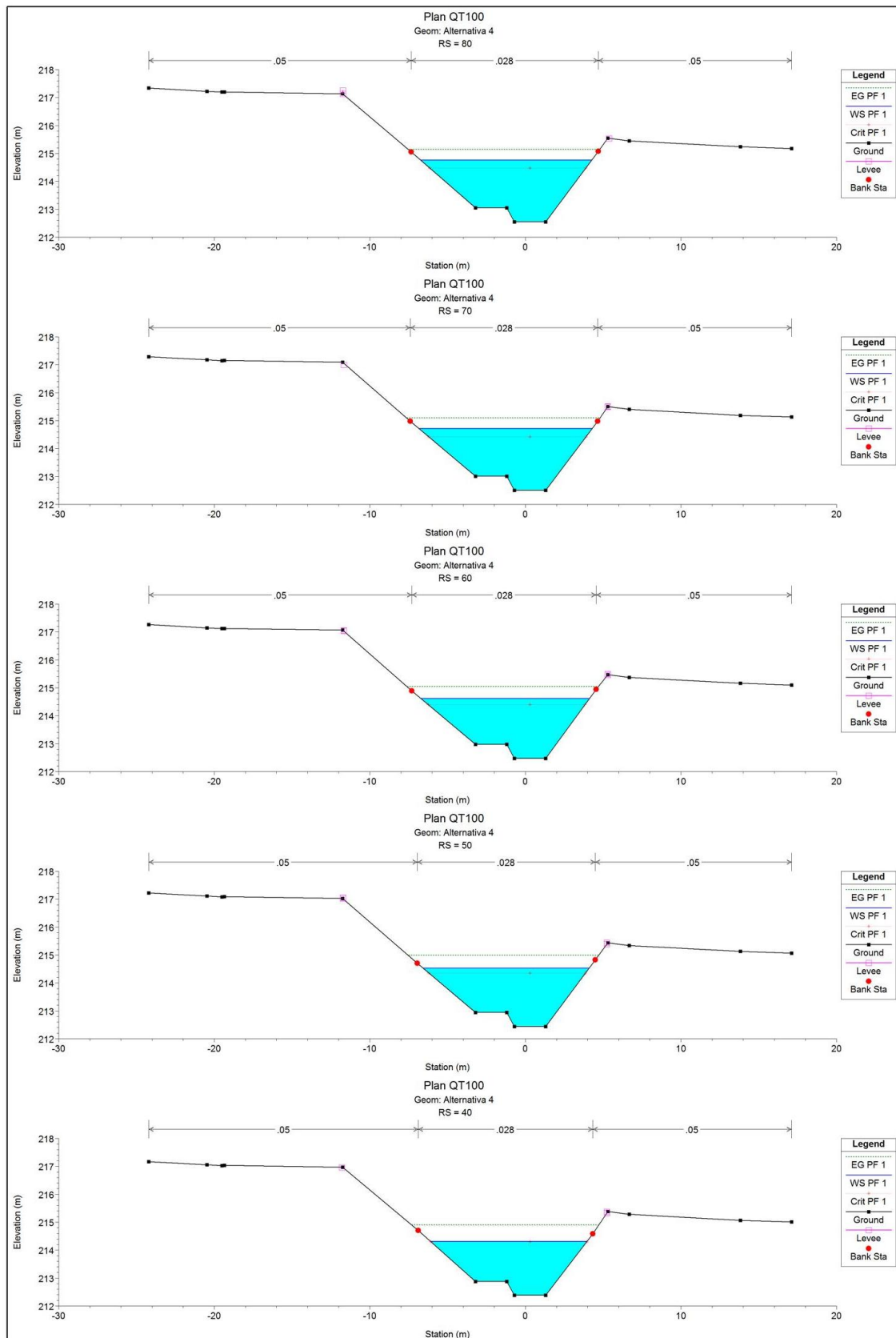


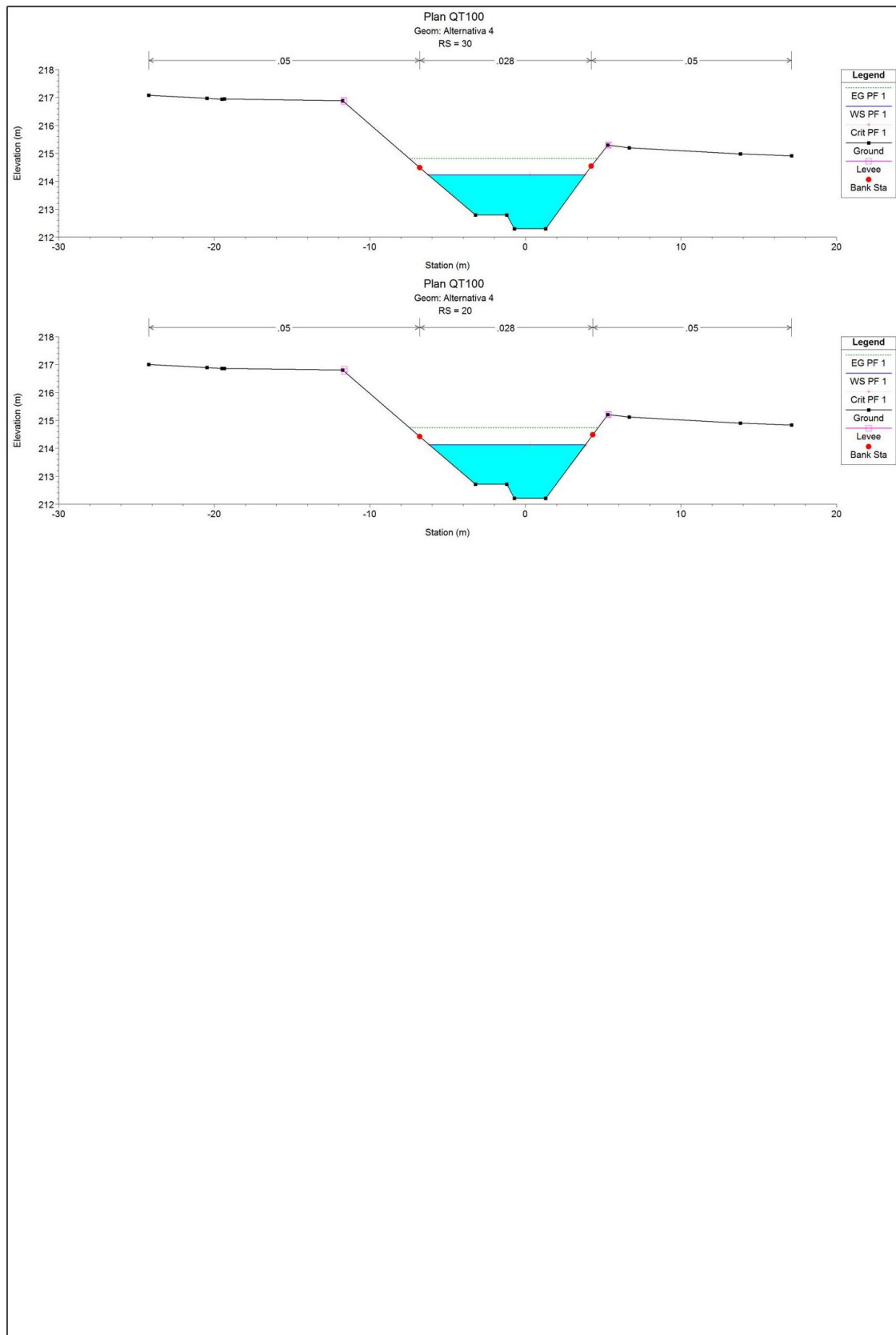












BIBLIOGRAFÍA



BIBLIOGRAFÍA

Alatorre, L.C. & Beguería, S. (2009). Los modelos de erosión: una revisión. *Cuaternario & Geomorfología*.

Algarra Ávila, J.A, Arrodo agudo, E. et al. (2002). Junta de Andalucía. *Datos botánicos aplicados a la Gestión del Medio Natural Andaluz II: Series de Vegetación*
http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/consolidado/publicacionesdigitales/40-762_ANEXO_CARTOGRAFICO_Y_SERIES_DE_VEGETACION-MODELOS_DE_RESTAURACION_FORESTAL/40-762/18_SERIES_DE_VEGETACION_CLIMATOFILAS_Y_EDAFOXEROFILAS-01.PDF

Andalucía. Consejería de Medio Ambiente (2004). *Usos y coberturas del suelo de Andalucía. 1991-1999*

Blair F.,E. (1965). *Manual de riegos y avenamientos*. Instituto colombiano de Reforma Agraria. Oficina de Divulgación. Serie de Estudios no. 8.

Chow, V.T (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York

Chow, V.T., Maidment, D., Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill, New York.

CORINE-CEC (Commission of the European Communities). (1992). *CORINE soil erosion risk and important land resources*.

Dirección General del Agua del MAGRAMA. Grupo tragsa. (2009). Proyecto de I+D+I: *Optimización de técnicas de bioingeniería para la mejora del estado ecológico y estabilización de márgenes de los ríos*.

Dumas Salazar, A. (2012). P.F.M: *Riesgo de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río mundo*.

FAO (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Cuarta edición. FAO, Roma.

Fernández Yuste, J.A. (2005). *Morfología fluvial y restauración de ríos*.

García Nájera J. M. (1954). *Pendiente máxima admisibles en las tierras de cultivo y cálculo de las terrazas intermitentes con desagüe para la conservación del suelo*. I.F.I.E. Madrid

Gisbert, J.M. e Ibáñez, S. (2003). *Procesos erosivos en la provincia de Alicante*. Conselleria de Medi Ambient. Generalitat Valenciana. Valencia.

Gómez Sanz, V. (2011). *Caracterización climática básica de un espacio natural*. Madrid: Servicio de Reprografía de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal.



Gonzalez del Tánago, M. (1991). *La ecuación universal de pérdidas de suelo. Pasado, presente y futuro.* Ecología, N.º 5, 1991, pp. 13-50. ICONA. Madrid

Hudson, N. (1982). *Conservación del suelo.* Reverte

I.F.I.E. (1968). *Índices de protección de la vegetación.* Sección de Hidráulica Torrencial. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (I.F.I.E.), 1968.

Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza. Ministerio de Agricultura y Alimentación (1957). *Mapas de Estados Erosivos de la cuenca Hidrográfica del Guadalquivir*

Juan, P., Mateu, J., Año, C., (2003). *Caracterización de la agresividad de la lluvia en la provincia de Castellón.*

Junta de Andalucía. (n.d.) V. *La evaluación de la erosión hídrica. Precedentes Metodológicos. Adaptación al valle central del río Guadalquivir.* pp.255-271.
http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Publicaciones_Divulgacion_Y_Noticias/Documentos_Tecnicos/Uso_y_erosion/PDFs/evaluacion7.pdf

López Cadenas del Llano, F. y Blanco Criado, M. (1968). *Aspectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica y del transporte y depósito de materiales.* IFIE. Madrid.

Mc Cuen, R. (1989). *Hydrologic analysis and design.* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Ministerio de Obras públicas (1990). *Instrucción 5.2-IC de Drenaje Superficial.* Centro de publicaciones de la secretaria técnica del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid.

Moore, L.D., and G.J. Burch. (1986). *Modelling Erosion and Deposition: Topographic Effects.* Transactions of the ASAE.

Moreira, J.M. (1994). *Capacidad de uso y erosión del suelo. Aproximación a una valoración económica de la erosión de Andalucía.* Rev. Paralelo 37º, nº 16 1993/1994 pp. 107-114. ed. Inst. Estudios Almerienses.

Pimentel, D. et al (1995). *Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits.* IFPRI, Washington, DC.

Ponce, V.M. (1989). *Engineering hydrology: principles and techniques.* Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey

Rivas-Martínez, S. (1988) *Bioclimatología, biogeografía y series de vegetación de andalucía occidental.*

Rivas-Martínez, S. (1996). *Geobotánica y Climatología.*



Rivas-Martínez, S. (1983). *Pisos bioclimáticos de España*. Lazaroa, 5, pp. 33- 43.

Santamaría Arias, J., Parrilla Alcaide, A., Moreu Mesa, F. (2001). Dirección General de Carreteras. *Guía para el proyecto y ejecución de obras de carretera del Ministerio de fomento*.

<http://www.fomento.gob.es/nr/rdonlyres/13f15da8-5568-4bf2-b380-31aa726f9f91/55894/0710300.pdf>

Singh, V.P. (1989). *Hydrologic systems: watershed modelling. Vol.II*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Vera, J.A. (2004). *Geología de España*. SGE-IGME, Madrid.

Wischmeier, W. H. y Smith D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses- A guide to conservation planning. U.S.D.A. Agriculture Handbook n.º 537. Washington D.C.

WRC Engineering, Inc. (1984). *Boulder County Storm Drainage Criteria Manual*. Denver, Colorado.

Zhang, Y., Degroote, J., Wolter, C., Sugumaran. R. (2009). Integration of modified universal soil loss equation (MUSLE) into a GIS framework to assess soil erosion risk. *Land degradation & development*. 20: 84–91.



PÁGINAS WEB

AEMET. Agencia Estatal de Meteorología. [En línea]. Disponible en:
<http://www.aemet.es/es/portada>. [Consultado: diciembre 2014].

ArcGIS online. Webmap viewer. [En línea]. Disponible en:
<http://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=c7923f4d113d4750b3615f76c614db19> [Consultado: junio 2014]

Ayuntamiento de Castro del Río. [En línea]. Disponible en:
<http://www.ayuntamientocastrodelrio.org> [Consultado: enero 2015].

Barres fotonatura. Archivo Digital especializado en Naturaleza y Geografía. [En línea]. Disponible en: <http://barresfotonatura.com/botanica/biomas> [Consultado: enero 2014]

C.H. Guadalquivir. Gestión del riesgo de inundación. [En línea]. Disponible en:
<http://www.chguadalquivir.es/opencms/portalchg/laDemarcacion/guadalquivir/laGestionAgua/gestionRiesgosInundacion> [Consultado: Enero 2014]

Coralca. Servicios agrícolas. [En línea]. Disponible en: www.coralca.es. [Consultado: enero 2015]

Edafología. Gestión de suelos. [En línea]. Disponible en: <http://www.edafologia.net/> [Consultado: diciembre 2014]

El balcón del olivar. [En línea]. Disponible en: www.elbancondelolivar.com. [Consultado: enero 2014]]

IEA. SIMA. Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. Sistema de Información Multiterritorial de Andalucía. [En línea]. Disponible en:
<http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/sima/index2.htm> [Consultado: enero 2015]

IGME. Instituto Minero y Geológico de España, MAGNA. [En línea]. Disponible en:
<http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/magna50.asp> [Consultado: enero 2014]

IGN. Instituto Geográfico Nacional. [En línea]. Disponible en: <http://www.ign.es/> [Consultado: enero 2014]

INE. Instituto Nacional de Estadística. [En línea]. Disponible en: <http://www.ine.es/> [Consultado: enero 2015]

Infolivo. Control de la erosión. [En línea]. Disponible en: <http://www.infolivo.com/> [Consultado: febrero 2015]

Jardin mundani. Naturaleza. [En línea]. Disponible en: jardin-mundani.blogspot.com [Consultado: enero 2015]



Junta de Andalucía. Medioambiente [En línea]. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/> [Consultado: enero 2014]

Lirgbio biología IV. Curso de biología. [En línea]. Disponible en lirgbio-evolucion-iv.blogspot.com. [Consultado: enero 2015]

MAGRAMA. Geoportal. [En línea]. Disponible en: <http://sig.magrama.es/geoportal/> [Consultado: marzo 2014].

Mapas vectoriales. Mapas de la provincia de Córdoba. [En línea]. Disponible en: www.mapasvectoriales.com [Consultado: diciembre 2013]

SEC. Sede Electrónica del Catastro. [En línea]. Disponible en: <http://www.sedecatastro.gob.es/> [Consultado: abril 2014]

TRAGSA. Grupo TRAGSA. [En línea]. Disponible en: <http://www.tragsa.es> [Consultado: abril 2014]

Tutoriales al día de ingeniería civil. [En línea]. Disponible en: <http://ingenieriacyil.tutorialesaldia.com/> [Consultado: diciembre 2014]

Viveros San Francisco. [En línea]. Disponible en: www.viverossanfrancisco.es [Consultado: enero 2015]

Wikipedia [En línea]. Disponible en: es.wikipedia.org. [Consultado: enero 2014]



LEGISLACIÓN

España. **Real Decreto 903/2010, de 9 de julio de 2010**, de evaluación y gestión de riesgos de inundación.

Europa. **Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000**, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.